

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Boris Hižman

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Damir Markučić
Mag.ing. Marko Rakvin

Student:

Boris Hižman

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu. Zahvaljujem se prof. dr. sc. Damiru Markučiću te mag.ing. Marku Rakvinu na stručnoj pomoći i podršci tijekom izrade ovog rada.

Boris Hižman



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Boris Hižman** Mat. br.: 0035172125

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Procjena stanjenja stijenke pomoću računalne radiografije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Assessment of wall thickness degradation by computed radiography**

Opis zadatka:

Računalna radiografija (cRT – *Computed Radiography*) danas u sve većoj mjeri pronalazi primjenu u raznim granama industrije uspješno zamjenjujući konvencionalnu industrijsku radiografiju pomoću filma. Indikacije stanjenja stijenke uslijed mehaničkih oštećenja ili drugih degradacijskih procesa, poput erozije ili korozije, relativno se lako uočava konvencionalnom industrijskom radiografijom, no gotovo ju je nemoguće pouzdano i kvantificirati.

Senzitometrijska karakteristika slikovnih ploča (*Imaging Plates*), senzora koji se koriste kod računalne radiografije, te pripadajućih digitalnih zapisa radiografske slike u pogledu povećanog dinamičkog raspona, kao i prednosti naknadne računalne obrade i analize digitalnog slikovnog zapisa, pružaju nove mogućnosti primjene cRT tehnike. U radu je potrebno istražiti mogućnosti upotrebe sustava za cRT u svrhu procjene stanjenja stijenke analizom intenziteta piksela područja od interesa (*ROI – Region of Interest*) na digitalnom radiogramu, što obuhvaća sljedeće zadatke:

- provesti istraživanje ovisnosti intenziteta piksela o relativnoj radiografskoj ekspoziciji,
- postaviti odgovarajući matematički model,
- provjeriti matematički model na odabranim ispitnim uzorcima,
- dati kritičku analizu mogućosti i ograničenja cRT-a za navedenu primjenu.

Zadatak zadan:

2. svibnja 2013.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Damir Markučić

Rok predaje rada:

4. srpnja 2013.

Predviđeni datum obrane:

10., 11. i 12. srpnja 2013.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

Sažetak

U ovom radu bit će prikazane mogućnosti korištenja sustava za računalnu radiografiju u svrhu procjene stanjenja stijenke analizom intenziteta piksela područja od interesa na digitalnom radiogramu. U tu svrhu provedeno je nekoliko eksperimenata na uzorku cijevi s poznatim stanjenjima stijenke cijevi. Također razmatrana su dva pristupa rješavanju problema:

- određivanje stanjenja stijenke pomoću referentnog uzorka na istom digitalnom radiogramu kao i uzorak;
- konstrukcijom krivulja odaziva slikovnih ploča na određenu dozu zračenja koje su korištene za neposredno utvrđivanje stanjenja stijenke.

Nakon savladavanja problematike istraživanja ovisnosti intenziteta piksela o relativnoj radiografskoj ekspoziciji te postavljanja i provjere odgovarajućeg matematičkog modela na ispitnim uzorcima, zaključno će biti izložena kritička analiza mogućnosti i ograničenja cRT-a za navedenu primjenu.

Iz provedene analize dobiveni su sljedeći zaključci:

- da bi se postigla najveća točnost mjerenja stanjenja stijenke cijevi potrebno je prilagoditi radiografsku ekspoziciju optimalnom području odaziva slikovne ploče (linearni dio);
- korištenjem većih energija zračenja moguće je provesti procjenu stanjenja stijenke u širem rasponu prozračenih debljina ispitnog objekta;
- upotrebom nižih energija zračenja omogućena je veća preciznost procjene stanjenja stijenke ispitnog objekta;
- pri istim energijama snimanja, doza zračenja ne utječe značajno na procjenu stanjenja stijenke cijevi ukoliko je osiguran uvjet da je radiografska ekspozicija prilagođena optimalnom području odaziva slikovne ploče;
- odaziv slikovne ploče u području zasićenja nije proporcionalan dozi zračenja;
- procjenu stanjenja stijenke cijevi moguće je neposredno odrediti pomoću prethodno konstruiranih krivulja slikovnih ploča.

U cilju postizanja veće točnosti procjene stanjenja stijenke cijevi pomoću analize intenziteta piksela na digitalnom radiogramu potrebno je dodatno provesti istraživanja utjecaja ujednačenosti snopa izvora ionizirajućeg zračenja, utjecaja prirasta debljine kao i ponovljivosti radiografske ekspozicije. Unatoč tome, dobiveni rezultati upućuju da je opisanu tehniku moguće koristiti za procjenu stanjenja stijenke cijevi u inženjerskoj praksi imajući na umu njezina ograničenja.

Sadržaj:

1. Uvod.....	1
2. Općenito o računalnoj radiografiji i primjene.....	2
2.1. Dijelovi sustava računalne radiografije	3
2.1.1. Svojstva slikovnih ploča	4
2.1.2. Princip rada laserskog skenera.....	6
2.1.3. Monitor za prikaz digitaliziranih zapisa radiograma	8
2.2. Prednosti i nedostaci sustava za računalnu radiografiju.....	9
2.3. Karakteristike radiograma	10
2.4. Postojeće metode snimanja.....	12
2.4.1. Metoda tangencijalne projekcije	13
2.4.2. Računalna procjena debljine stijenke	13
2.4.3. Procjena korozije lokalnim promjenama intenziteta	13
2.5. Osnove izračuna linearnog i masenog koeficijenta prigušenja	13
3. Opis praktičnog dijela rada	16
4. Praktični dio	17
4.1. Teorijski prikaz odnosa intenziteta piksela i debljine materijala	17
4.2. Snimanje stepeničastih ispitnih uzoraka.....	19
4.3. Mjerenje intenziteta piksela stepeničastih ispitnih uzoraka.....	21
4.3.1. Grafički prikaz ovisnosti intenziteta piksela i debljine materijala	24
4.3.2. Grafički prikaz ovisnosti omjera zacrnljenja I i I_0 te debljine materijala	29
4.4. Snimanje ispitnog uzorka cijevi	32
4.4.1. Mjerenje intenziteta piksela na ispitnom uzorku cijevi.....	33
4.4.2. Izračun dubina provrta i greške	35
4.5. Snimanje ispitnog stepeničastih uzoraka te ispitnog uzorka cijevi	37
4.5.1. Mjerenje intenziteta piksela na ispitnoj cijevi te stepeničastom uzorku	37
4.5.2. Izračun dubina provrta i greške	40
4.6. Snimanje zakrenutog ispitnog uzorka cijevi.....	41
4.6.1. Mjerenje intenziteta piksela na zakrenutom ispitnom uzorku cijevi.....	42
4.6.2. Izračun dubina provrta i greške	43
4.7. Snimanje stepeničastih ispitnih uzoraka drugi put	44
4.7.1. Mjerenja intenziteta piksela za stepeničasti uzorak drugi put.....	44

4.7.2.	Grafički prikaz ovisnosti intenziteta piksela i debljine materijala	45
4.8.	Snimanje ispitnog uzorka cijevi drugi put	47
4.8.1.	Mjerenja intenziteta piksela ispitnog uzorka cijevi drugi put	47
4.8.2.	Izračun dubina provrta i greške	48
5.	Zaključak.....	50
6.	Literatura.....	51

Popis slika

Slika 1 Slojevi slikovne ploče [1].....	4
Slika 2 Odnos zacrnjenja i doze običan film i slikovnu ploču [2].....	5
Slika 3 Apsorpcija X-ray zraka/energija X-ray [7]	6
Slika 4 Specifikacija slikovnih ploča [5].....	6
Slika 5 Osnovni princip rada laserskog uređaja[2].....	7
Slika 6 Uređaj za skeniranje VMI5100MS[5].....	8
Slika 7 Karakteristike uređaja VMI5100MS[5]	8
Slika 8 Karakteristike monitora visoke rezolucije[5].....	9
Slika 9 Transmisija na različitim energijama [6].....	11
Slika 10 Prirast debljine kod tangencijalne tehnike [8]	12
Slika 11 Odnos broja fotona koji prođu kroz materijal i debljine materijala [6].....	14
Slika 12 Odnos zacrnjenja I i I_0 za navedene energije.....	19
Slika 13 Centriranje izvora zračenja.....	19
Slika 14 Mjerenje udaljenosti izvora zračenja.....	20
Slika 15 Mjerenje intenziteta piksela na ispitnom stepeničastom uzorku	21
Slika 16 Ovisnost intenziteta i debljine materijala	25
Slika 17 Odabir područja od interesa	25
Slika 18 Analiza područja od interesa	26
Slika 19 Ovisnost intenziteta i debljine materijala aproksimirano logaritamskom funkcijom.....	27
Slika 20 Usporedba intenzitet-debljina za iste energije i različito vrijeme ekspozicije	28
Slika 21 Usporedba intenziteta i debljine materijala za različite energije.....	28
Slika 22 Usporedba intenziteta i debljine za različite energije, primjer	29
Slika 23 Ovisnost omjera zacrnjenja I i I_0 te debljine materijala	30
Slika 24 Ovisnost omjera zacrnjenja I i I_0 te izmjerene debljine materijala X aproksimirana logaritamskom funkcijom.....	31
Slika 25 Usporedba ovisnosti omjera zacrnjenja I i I_0 te izmjerene debljine materijala X za različite energije	31
Slika 26 Ispitni uzorak cijevi s provrtima.....	32
Slika 27 Mjerenje intenziteta piksela na ispitnom uzorku cijevi.....	33
Slika 28 Mjerenje intenziteta piksela na ispitnom uzorku cijevi i stepeničastom uzorku	38
Slika 29 Ovisnost omjera zacrnjenja I i I_0 te izmjerene debljine materijala X aproksimirana logaritamskom funkcijom za stepeničasti uzorak.....	39
Slika 30 Mjerenje intenziteta piksela na zakrenutom ispitnom uzorku cijevi i stepeničastom uzorku ..	42
Slika 31 Mjerenje intenziteta piksela na stepeničastom uzorku drugi put.....	44
Slika 32 Ovisnost intenziteta piksela i debljine za 175kV_4mA_3min	45
Slika 33 Ovisnost intenziteta piksela i debljine za 200kV_4mA_1,5min	46
Slika 34 Ovisnost intenziteta piksela i debljine za 250kV_4mA_50sec	46
Slika 35 Mjerenje intenziteta piksela na ispitnom uzorku cijevi drugi put	47

Popis tablica

Tablica 1 Odnos I i I_0 pri $U=100\text{kV}$	17
Tablica 2 Odnos I i I_0 pri $U=150\text{kV}$	18
Tablica 3 Odnos I i I_0 pri $U=200\text{kV}$	18
Tablica 4 Intenziteti piksela pri $10\text{min}_4\text{mA}_{150\text{kV}}$	22
Tablica 5 Intenziteti piksela pri $6,5\text{min}_4\text{mA}_{150\text{kV}}$	22
Tablica 6 Intenziteti piksela pri $2\text{min}_4\text{mA}_{200\text{kV}}$	23
Tablica 7 Intenziteti piksela pri $1\text{min}_4\text{mA}_{250\text{kV}}$	23
Tablica 8 Intenziteti piksela pri $3.5\text{min}_4\text{mA}_{175\text{kV}}$	24
Tablica 9 Intenziteti piksela I_c i I_R pri $3.5\text{min}_4\text{mA}_{175\text{kV}}$	34
Tablica 10 Intenziteti piksela I_c i I_R pri $2\text{min}_4\text{mA}_{200\text{kV}}$	34
Tablica 11 Intenziteti piksela I_c i I_R pri $1\text{min}_4\text{mA}_{250\text{kV}}$	34
Tablica 12 Koeficijenti y_1 i y_2 pri $3.5\text{min}_4\text{mA}_{175\text{kV}}$	34
Tablica 13 Koeficijenti y_1 i y_2 pri $2\text{min}_4\text{mA}_{200\text{kV}}$	35
Tablica 14 Koeficijenti y_1 i y_2 pri $1\text{min}_4\text{mA}_{250\text{kV}}$	35
Tablica 15 Usporedba izmjerenih i izračunatih dubina provrta pri $3.5\text{min}_4\text{mA}_{175\text{kV}}$	35
Tablica 16 Usporedba izmjerenih i izračunatih dubina provrta pri $2\text{min}_4\text{mA}_{200\text{kV}}$	36
Tablica 17 Usporedba izmjerenih i izračunatih dubina provrta pri $1\text{min}_4\text{mA}_{250\text{kV}}$	36
Tablica 18 Intenziteti piksela za stepeničasti uzorak uz ispitni uzorak cijevi pri $3.5\text{min}_4\text{mA}_{175\text{kV}}$	38
Tablica 19 Intenziteti piksela za stepeničasti uzorak uz ispitni uzorak cijevi pri $2\text{min}_4\text{mA}_{200\text{kV}}$..	38
Tablica 20 Intenziteti piksela za stepeničasti uzorak uz ispitni uzorak cijevi pri $1\text{min}_4\text{mA}_{250\text{kV}}$..	39
Tablica 21 Usporedba izmjerenih i izračunatih dubina provrta pri $3.5\text{min}_4\text{mA}_{175\text{kV}}$ drugi put.....	40
Tablica 22 Usporedba izmjerenih i izračunatih dubina provrta pri $2\text{min}_4\text{mA}_{200\text{kV}}$ drugi put.....	41
Tablica 23 Usporedba izmjerenih i izračunatih dubina provrta pri $1\text{min}_4\text{mA}_{250\text{kV}}$ drugi put.....	41
Tablica 24 Intenziteti piksela I_c i I_R pri $1\text{min}_4\text{mA}_{200\text{kV}}$, zakrenuta ispitna cijev	43
Tablica 25 Koeficijenti y_1 i y_2 pri $1\text{min}_4\text{mA}_{200\text{kV}}$, zakrenuta ispitna cijev	43
Tablica 26 Usporedba izmjerenih i izračunatih dubina provrta pri $1\text{min}_4\text{mA}_{250\text{kV}}$, zakrenuta ispitna cijev.....	44
Tablica 27 Intenziteti piksela za stepeničasti uzorak 2. put	45
Tablica 28 Intenziteti piksela I_c i I_R pri $3\text{min}_4\text{mA}_{175\text{kV}}$	48
Tablica 29 Intenziteti piksela I_c i I_R pri $1,5\text{min}_4\text{mA}_{200\text{kV}}$	48
Tablica 30 Intenziteti piksela I_c i I_R pri $50\text{sec}_4\text{mA}_{250\text{kV}}$	48
Tablica 31 Usporedba izmjerenih i izračunatih dubina provrta pri $3\text{min}_4\text{mA}_{175\text{kV}}$	48
Tablica 32 Usporedba izmjerenih i izračunatih dubina provrta pri $1.5\text{min}_4\text{mA}_{200\text{kV}}$	49
Tablica 33 Usporedba izmjerenih i izračunatih dubina provrta pri $50\text{sec}_4\text{mA}_{250\text{kV}}$	49

Popis fizikalnih veličina i mjernih jedinica

μ [1/m] - linearni koeficijent prigušenja

μm [m²/kg] - maseni koeficijent prigušenja

ρ [kg/m³] - gustoća

U [V] - napon

I [A] - struja

t [s] – vrijeme

1. Uvod

U ovom radu bit će prikazane mogućnosti korištenja sustava za računalnu radiografiju u svrhu procjene stanjenja stijenke analizom intenziteta piksela područja od interesa na digitalnom radiogramu.

Računalna radiografija danas u sve većoj mjeri pronalazi primjenu u raznim granama industrije te uspješno zamjenjuje industrijsku, već pomalo zastarijelu, radiografiju uz pomoć filma. Indikacije stanjenja stijenke uslijed raznih degradacijskih procesa vrlo su lako uočljive, no relativno teško pouzdano i točno kvantificirane konvencionalnom industrijskom radiografijom. Razvojem tehnologije na području obrade slike, ali i drugim segmentima usko vezanim za računalnu radiografiju, otvorene su nove mogućnosti u analizi i kvantifikaciji degradacijskih procesa.

Senziometrijska karakteristika slikovnih ploča (eng. *Imaging Plates*), senzori koji se koriste kod računalne radiografije te pripadajući digitalni zapisi radiografske slike u pogledu povećanog dinamičkog raspona, kao i već navedene prednosti naknadne računalne obrade i analize digitalnog slikovnog zapisa, prednosti su cRT-a (eng. *Computed Radiography*) na kojima se temelje mogućnosti kvantifikacije degradacijskih procesa.

Nakon savladavanja problematike istraživanja ovisnosti intenziteta piksela o relativnoj radiografskoj ekspoziciji te postavljanja i provjere odgovarajućeg matematičkog modela na ispitnim uzorcima, zaključno će biti izložena kritička analiza mogućnosti i ograničenja cRT-a za navedenu primjenu.

2. Općenito o računalnoj radiografiji i primjene

Računalna radiografija danas u sve većoj mjeri pronalazi primjenu u raznim granama industrije te uspješno zamjenjuje industrijsku, već pomalo zastarijelu, radiografiju uz pomoć filma. Razlog tome je širok spektar mogućnosti te poboljšanja koje računalna radiografija nudi. Rendgenski uređaji omogućuju drugačiji pogled na promatrani dio, pogled u njegovu strukturu. Razvojem tehnologije, usavršavaju se stare te razvijaju nove tehnologije koje pomiču granice, omogućuju nove poglede i novi pristup starim problemima. Unaprijeđenje tehnologije rezultiralo je razvojem cRT tehnologije koja svojim mogućnostima pomiče granice primjene industrijske radiografije na nove razine. U ovom radu detaljno će se govoriti o mogućnostima primjene cRT uređaja u svrhu procjene stanjenja stijenke analizom intenziteta piksela područja od interesa na digitalnom radiogramu te zaključcima koje je moguće donijeti na osnovu provedenih ispitivanja.

Sustavi računalne radiografije u osnovi imaju princip rada jednak radiografiji pomoću filma. Rendgenski uređaj emitira X-zrake koje djelomično ili u potpunosti prolaze kroz ispitni uzorak te izazivaju fluorescenciju. Zapis koji nastaje tim putem pohranjuje se na film ili na slikovnu ploču i na taj način nastaje glavna razlika između ovih dvaju radiografskih metoda. Zapis pohranjen na film razvija se u kontroliranim kemijskim uvjetima te dobivamo radiogram snimljenog uzorka čija je daljnja analiza ograničena svojstvima filma te tehnologije koja ga prati. Zapis pohranjen na slikovnu ploču prebacuje se u digitalni oblik pomoću posebno razvijenog skenera za očitavanje latentne slike. Slika u digitalnom obliku pogodna je za daljnje analize koje omogućava prateća tehnologija cRT sustava a o kojoj će u radu biti detaljnije razrađeno.

Razvoj cRT uređaja omogućio je ostvarivanje velikih rezolucija koje osiguravaju visoku razinu detaljnosti radiograma nudeći širok spektar informacija o snimljenom objektu. Također velika prednost cRT uređaja je dobivanje zapisa radiograma u računalnom formatu što omogućava obradu slike s različitim programskim paketima koje proizvođači isporučuju zajedno s cRT uređajima. Zapis snimljen u računalnom formatu omogućava brzu i jednostavnu razmjenu, izradu kopija te ostale pogodnosti koje proizlaze iz korištenja računalnih tehnologija.

Zbog navedenih prednosti, računalna radiografija otvorila je mogućnosti istraživanja kvantifikacije degradacijskih procesa ispitnih uzoraka. U nastavku će detaljnije biti obrađeni dijelovi koji čine sustav računalne radiografije cjelinom.

2.1. Dijelovi sustava računalne radiografije

Računalna radiografija naziv je za tehnologiju koja omogućava snimanje radiograma na slikovne ploče koje sadrže fotosenzitivni sloj fosfora. Snimljena slikovna ploča tada se očitava pomoću specijalnog laserskog skenera. Digitalni zapis radiograma moguće je pohraniti i analizirati na računalu te prikazati na monitoru visoke rezolucije. Ovakvi sustavi imaju vrlo velik dinamički raspon u odnosu na klasični film, značajno su osjetljiviji na zračenje što zahtijeva manju dozu zračenja te na taj način i skraćuje potrebno vrijeme ekspozicije.[3]

Snimanje radiograma sustavima za računalnu radiografiju proces je koji se sastoji od dva koraka. Slika se ne formira direktno, već kroz međukorak jednako kao i kod klasičnog filma. Slika se kasnije pretvara u svjetlost u laserskom skeneru, nakon stimulacije, te tek tada dobijemo sliku u računalnom formatu. Za razliku od klasičnog filma gdje se latentna slika sprema u srebro-halidne kristale te se razvija kemijski, kod sustava za računalnu radiografiju latentna slika sprema se u fotosenzitivan sloj fosfora.

Važnost računalne radiografije nazire se u činjenici da omogućava kvalitetniju obradu radiograma. Računalo se koristi kako bi se digitalni zapis radiograma obradio na način koji omogućava najvišu kvalitetu prikaza što ranije kod uobičajenog pregleda radiograma na iluminatoru nije bilo moguće.

Tradicionalna radiografija od svog nastanka 1885. godine koristi film za pohranjivanje radiograma. Dobra strana računalne radiografije je što može koristiti konvencionalnu opremu tj. izvore zračenja za snimanje radiograma na slikovne ploče. Kao što je već ranije spomenuto, nakon toga slijedi skeniranje latentne slike sa slikovne ploče pomoću laserskog skenera te njezino pretvaranje u digitalni zapis.

Oprema za računalnu radiografiju varira od malih prijenosnih skenirajućih uređaja do velikih uređaja koji su sposobni procesuirati 200 radiograma po satu. Cjelovit sustav sastoji se od izvora zračenja, slikovne ploče, skenera, monitora visoke rezolucije, računala, tipkovnice, miša te programskog paketa za obradu slike.

Računalna radiografija ima brojne mogućnosti primjene u industriji, a najznačajniji od tih primjera su sljedeći:

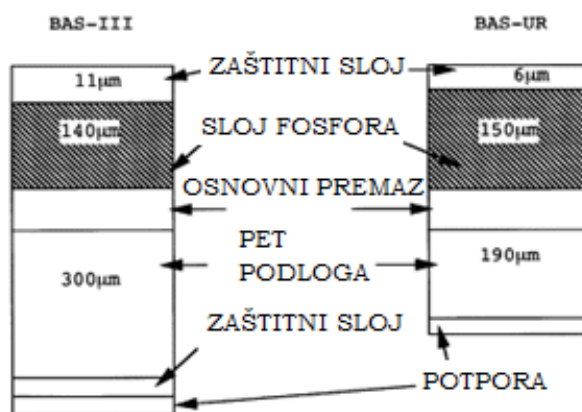
- ispitivanje korozije na cijevima
- ispitivanje korozijskih oštećenja na ventilima
- provjera stanja ventila (nepropusnost ventila i provjere zapreka u ventilima)
- ispitivanje zavora
- ispitivanje odljevaka

2.1.1. Svojstva slikovnih ploča

Računalna radiografija koristi posebne ploče za snimanje radiograma umjesto filma. Takve ploče sastoje se od fotoosjetljivih slojeva fosfora koje X-zrake ioniziraju. Tanki slojevi fosfora nanoseni su na savitljivu bazu. Prolaskom laserske zrake prilikom skeniranja, laser pobuđuje ionizirani fosforni sloj koji počinje emitirati svjetlost ovisno o stupnju ionizacije. Razlike u zacrnjenju pojedinog djela radiograma daju sliku te stvaran uvid o stanju ispitnog uzorka koji je kasnije moguće analizirati. Ploče se mogu razlikovati prema debljini fosforescentnog sloja. Deblji slojevi su osjetljiviji, ali daju u konačnici manju oštrinu zbog raspršenja stimulirajućeg zračenja. Stoga se podešavanjem debljine fosfornog sloja može izbalansirati oštrina i osjetljivost te postići standardni ili visoko-rezolucijski zaslon. Također kada se postigne optimalna debljina fosforescentnog sloja daljnje povećanje debljine imat će minimalne učinke na povećanje efikasnosti i oštine. [4]

Tehnologija izrade slikovnih ploča datira iz 1975. godine. Fleksibilne fosforne slikovne ploče izgledom su nalik na standardni film. Sastoje se od fosfornog sloja finih zrnaca, barij-florohalidnih kristala koji apsorbiraju dvovalentni europij (Eu^{2+}). Kada je fosfor u slikovnim pločama izložen ionizirajućem zračenju elektroni u ploči se pobuđuju te prelaze u viši energetske nivo u kojem postaju zarobljeni u halidnim prazninama te na taj način tvore latentnu sliku ispitnog uzorka. Ionizirajuće zračenje uzrokuje da dvovalentni europij postane trovalentni europij. Ta latentna slika stabilna je nekoliko dana.

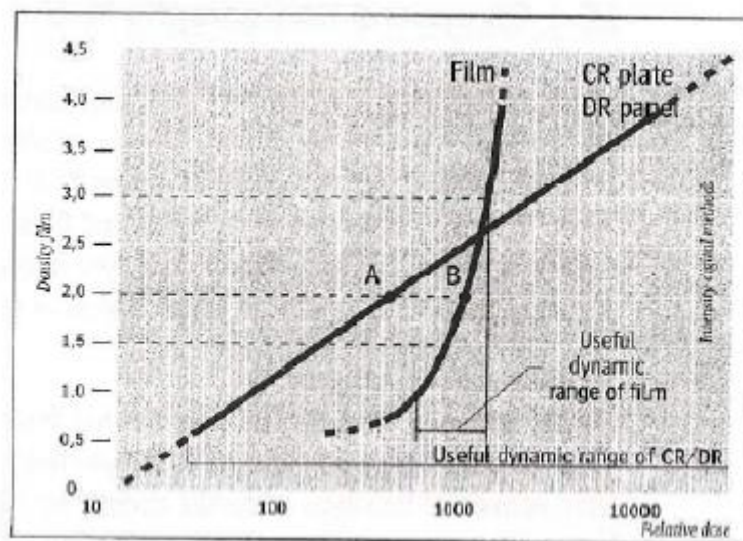
Kako je već prethodno navedeno, slikovne ploče sastoje se od nekoliko slojeva. Osim fosforescentnih slojeva postoje i zaštitni slojevi te dodatni laminatni sloj koji određuje mehanička svojstva poput fleksibilnosti. Na slici 1 prikazan je presjek slikovne ploče kako bi se vidjeli slojevi od kojih je izrađena. [5]



Slika 1 Slojevi slikovne ploče [1]

Velika prednost ovih ploča je što omogućuju da se u istom snimanju snime objekti s velikim rasponom debljina ili objekti od različitih materijala. To eliminira potrebu za postavljanjem ekspozicija veći broj puta što štedi vrijeme i novac. U praksi veći dinamički raspon osigurava da slikovne ploče s fosfornim slojem lakše dolaze u zasićenje te je odnos zacrnjenja prema

relativnoj ekspoziciji linearan dok kod konvencionalnog filma srebro-halidni kristali reagiraju ekponencijalno što se vidi na slici 2. Na slici je vidljivo da kod običnog radiografskog filma na početku s primjenom ekspozicije dolazi do male promjene u kontrastu. Dio gdje je krivulja strma za malu promjenu u ekspoziciji filma vidi se veliki kontrast. S druge strane, kod slikovnih ploča koje se koriste kod cRT uređaja vidimo da je ta promjena linearna. To će u konačnici rezultirati da je kod klasičnog filma moguće, ukoliko se pogodi uzak dio krivulje gdje je ona strma, ostvariti veći kontrast nego kod slikovnih ploča. Prednost linearnog ponašanja slikovnih ploča je što su one znatno manje osjetljive na parametre snimanja, pa u konačnici neće biti grešaka i ponavljanja snimanja uslijed netočno odabranih parametara te će se za povećanje ekspozicije linearno povećavati i kontrast. To za posljedicu ima skraćanje vremena ispitivanja, smanjenje broja ponavljanja snimanja te samim time i smanjenje troškova.

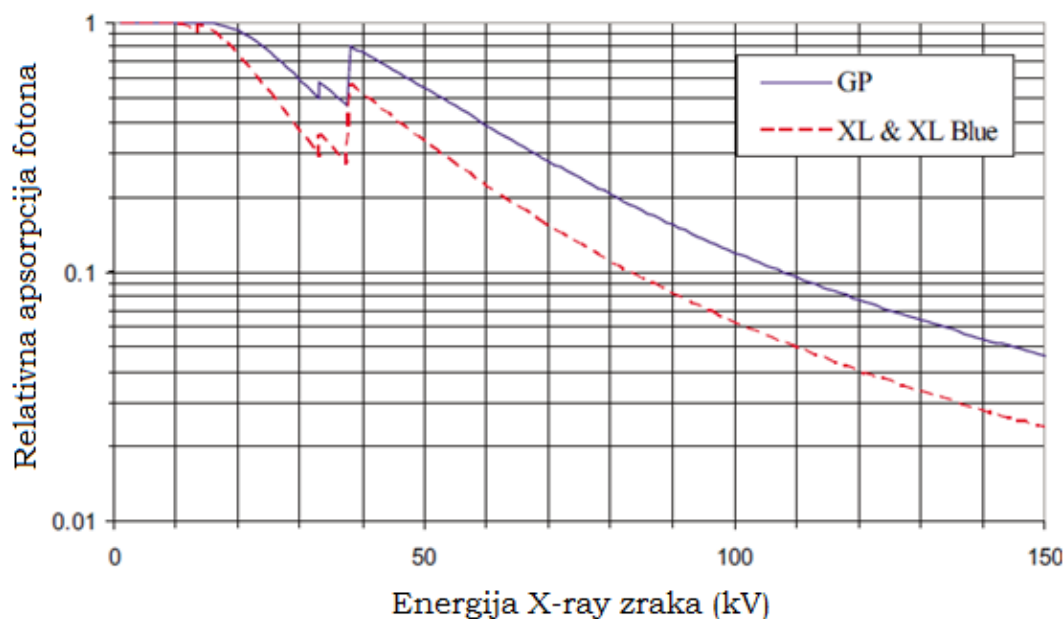


Slika 2 Odnos zacrnenja i doze običan film i slikovnu ploču [2]

Veći dinamički raspon ovih ploča smanjuje utjecaj vremena ekspozicije što smanjuje broj potrebnih ponavljanja te omogućava snimanje objekata različitih debljina. Nadalje, ove ploče imaju prednost i kod podeksponiranosti jer se ona može kompenzirati obradom u programskom paketu.

Niže na slici 3. moguće je vidjeti koliko se fotona apsorbira u odnosu na emitiranu energiju na slikovnim pločama. Slikovne ploče imaju veću osjetljivost na energije do 50 kV kao što je prikazano na dijagramu. Plava linija na grafu prikaz je slikovnih ploča standardne rezolucije, dok crvena prikazuje slikovne ploče visoke rezolucije. Korištenje olovnih podloga obavezno je za energije iznad 100 kV kako bi se zadržala optimalna kvaliteta slike. Debljina podloge određuje se eksperimentalno budući da mora biti dva do tri puta deblja od one podloge koja bi se koristila u slučaju upotrebe filma.

Apsorpcija X-ray zraka/energija x-ray zraka



Slika 3 Apsorpcija X-ray zraka/energija X-ray [7]

Slika 4 prikazuje materijale od kojih se izrađuje fotoosjetljiv sloj slikovne ploče, najčešće dimenzije slikovnih ploča te temperaturni raspon u kojem je dozvoljeno rukovati s njima kako se ne bi oštetile, ali i kako bi se dobila optimalna kvaliteta slike.

Materijal	BaFBr: Eu ²⁺ Barij Florbromid
Veličina ploča [mm]	(12,7 x 17,8), (11,4 x 25,4), (11,4 x 43,18), (20,3 x 25,4), (25,4 x 30,5), (17,8 x 43,2), (35,6 x 43,2), (35,6 x 129,5), (35,6 x 167,6)
Temperaturni raspon	-10° do +48°C

Slika 4 Specifikacija slikovnih ploča [5]

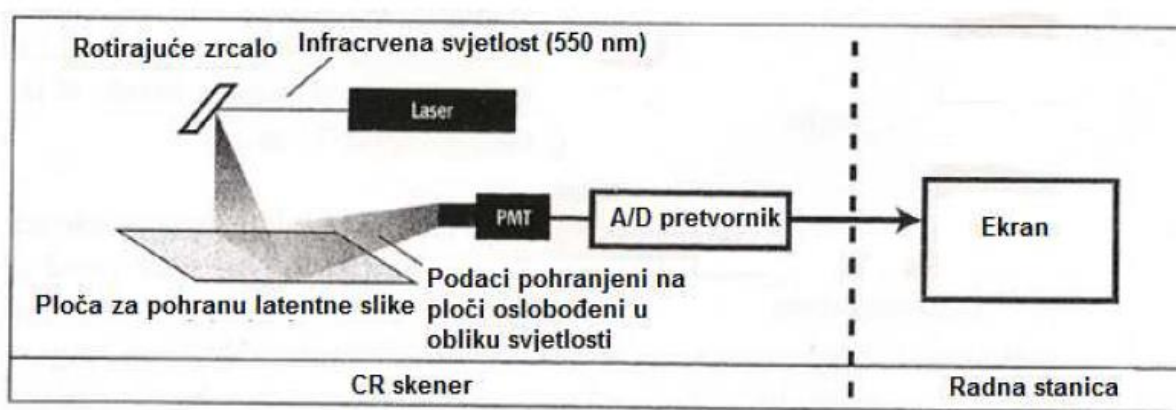
Kada se radiogram snimljen na ploču skenira s laserskom zrakom u skeneru, latentni podaci s radiograma oslobađaju se u obliku vidljive svjetlosti. Svjetlost se detektira te se informacije pretvaraju u digitalni oblik i na taj način dobivamo digitalizirani zapis radiograma.

2.1.2. Princip rada laserskog skenera

Laserski skener jedan je od sastavnih dijelova sustava računalne radiografije. Energija lasera uzrokuje oslobađanje zarobljenih elektrona u fosfornom dijelu slikovne ploče te time uzrokuje nastanak odnosno emisiju vidljive svjetlosti. Svjetlost se detektira, a potom konvertira u

digitalni zapis, tj. nizove bitova koji čine digitalni zapis radiograma. Kasnije će detaljnije biti objašnjen princip rada te postupak skeniranja pomoću laserskog uređaja.

Kada slikovnu ploču izložimo X-zrakama dio elektrona se pobudi i prelazi na višu energetska razinu gdje biva zarobljen u polustabilnom stanju te na taj način nastaje latentna slika. Zarobljene elektrone moguće je osloboditi pomoću laserske zrake visoke energije. Stimulacija laserskom zrakom uzrokuje emisiju vidljive svjetlosti koja se zabilježava pomoću PMT cijevi (eng. *Photo Multiplier Tube*). Valna duljina laserske zrake je 550 nm, a valna duljina emitirane vidljive svjetlosti iznosi 400 nm. Uređaj za lasersko skeniranje latentne slike opremljen je uređajem s PMT cijevi te pripadajućom elektronikom kako bi se mogli digitalizirati analogni svjetlosni signali koji nastaju prilikom prolaska kroz laser. Na sljedećoj slici 5. prikazan je osnovni princip rada laserskih uređaja.



Slika 5 Osnovni princip rada laserskog uređaja[2]

Laserska skeniranja u ovom radu vršena su na sustavu za računalnu radiografiju naziva VMI5100MS. Ovaj sustav sastoji se od skenera koji pomoću laserske zrake vrši 16-bitno skeniranje sa slikovne ploče te iščitava latentnu sliku pri rezoluciji od 50 μm s mogućnošću skeniranja 60 slika u satu. 16-bitno skeniranje osigurava 65 000 nijansi sive boje za postizanje maksimalnog kontrasta. Brzina rada ovog uređaja temelji se na činjenici da se uz istovremeno skeniranje radiograma obavlja i njegovo brisanje tako da je slikovna ploča ponovo spremna za uporabu. U nastavku slijedi slika 6 uređaja VMI5100MS te slika 7 s pregledom karakteristika navedenog uređaja.



Slika 6 Uređaj za skeniranje VMI5100MS[5]

Izvor svjetlosti / Senzor	Laserska dioda / PMT
Dubina piksela / dubina bit-a	65000 nijansi sive/ 16 bit file
Veličina laserskog snopa	50 μ ~ 200 μ (kod 10 μ koraka)
Proizvodnost	Preko šezdeset slika po satu
Pomični sustav	Sustav s jednostrukom akcijom
Pohrana/brisanje	Automatsko, u jednom prolazu
Sučelje	USB 2.0
Operativni sustav	XP Professional
Napajanje	100-240V AC/ 2.5A max; 47-63 Hz
Mrežna komunikacija	Podrška DICOM / DICONDE
Težina	31,7 kg
Dimenzije	Veličina stola

Slika 7 Karakteristike uređaja VMI5100MS[5]

2.1.3. Monitor za prikaz digitaliziranih zapisa radiograma

Razvoj cRT uređaja omogućio je ostvarivanje velikih rezolucija koje osiguravaju visoku razinu detaljnosti radiograma nudeći širok spektar informacija o snimljenom objektu, a za njihov što kvalitetniji prikaz potreban je LCD monitor vrlo visoke rezolucije. U radu je korišten monitor rezolucije 3 megapiksela s mogućnošću prikaza 1024 nijansi sive boje, tj. 10 bitnim prikazom piksela. Rezolucija navedenog monitora je 2048x1536 piksela. Sustav za računalnu radiografiju uz monitor i laserski skener raspolaže i računalom s programskim

paketom „startview software“ potrebnim za skeniranje i obradu digitaliziranih zapisa radiograma. U nastavku slijede karakteristike monitora visoke rezolucije koji je izgledom jednak LCD monitorima za svakodnevnu uporabu.

Tehnologija	TFT AMLCD Dual Domain IPS
Dubina bit-a	10 bit (1024 nijanse sive)
Grafička kartica	Grafička kartica visoke rezolucije
Nazivna rezolucija	3 Mega piksela (2048 x 1536)
„Pixel pitch“	0.207 mm
Aktivna dijagonala ekrana	528 mm (20.8")
Aktivna širina ekrana	423.9 mm (16.7")
Aktivna visina ekrana	318 mm (12.5")
Kut gledanja	170° (10:1 kontrast)
Kontrast	Tipično 900:1
Osvjetljenje	500 cd/m ² Kalibrirano 700 cd/m ² Maksimalno

Slika 8 Karakteristike monitora visoke rezolucije[5]

2.2. Prednosti i nedostaci sustava za računalnu radiografiju

Jednostavnost ove metode je činjenica da se rezultati skeniranjem pohranjuju izravno u računalo, koje služi za interpretaciju, te nema potrebe za procesom razvijanja radiograma. Također jedna od prednosti računalne radiografije je što se podaci sa slikovne ploče pohranjuju u digitalnom obliku i na taj način ne gube na kvaliteti što je čest slučaj s klasičnim radiogramima koji zbog utjecaja vremena ili manipulacije budu oštećeni. Prijenos digitalnih radiograma je omogućen na svako računalo bez ograničenja u broju kopija, a potrebe za ispisom gotovo ne postoje. Na takav način ostvaruju se uštede i briga za okoliš. Ploče za snimanje radiograma u CRT tehnologiji presvučene su posebnim slojem za zaštitu od mehaničkih oštećenja i trošenja, pa ih je moguće čistiti raznim sredstvima za čišćenje. S obzirom na navedeno, ploče imaju visok stupanj izdržljivosti i trajnosti. Bitno je napomenuti da uz dobra mehanička svojstva, ploče za računalnu radiografiju imaju visoku toleranciju na različite parametre snimanja radiograma što omogućava veću slobodu u odabiru ekspozicije. Posljedica tih svojstava je velika uspješnost snimanja u prvom pokušaju, stoga nije potrebno trošiti dodatno vrijeme na ponavljanje postupka. Kemijski sastav osigurava visok stupanj efikasnosti apsorpcije i homogenosti te time visok stupanj oštine radiograma. Površinski sloj zbog svoje glatkoće smanjuje razinu šuma uslijed zrnatosti fosforescentnog sloja. Dobra strana računalne radiografije je i u tome što je to svojevrsna nadogradnja sustava za radiografiju pomoću filma te nema potrebe za zamijenom rendgenskog uređaja, a time ni dodatnih troškova. Računalna radiografija uz navedene prednosti ima i nedostatke koji su

pretežito uzrokovani ne tako davnim otkrićem ove tehnologije. Neki od uočenih nedostataka su:

- općenito se ručno rukovanje slikovnim pločama smatra nedostatkom, iako ono može biti i prednost budući da omogućava veću fleksibilnost pri namještanju predmeta snimanja
- cRT još uvijek nije odobrena metoda za snimanje radiograma visoke rezolucije u svemirskoj industriji zbog mogućnosti digitalne manipulacije slikom te veće geometrijske izoštrenosti u odnosu na standardni film
- ne postoje suglasnosti vodećih proizvođača opreme oko procedura
- ne postoje standardi kvalitete, tj. rezolucije slike za opću radiografiju, iako je konkurencija među proizvođačima opreme pozitivno utjecala na porast stupnja kvalitete i unapređenje tehnologije
- slikovne ploče su skupe te postoji mogućnost njihova oštećenja. Iako se u teoriji mogu koristiti više tisuća puta, dugotrajno korištenje i rukovanje uzrokuje oštećenja te ih je nakon nekog vremena potrebno zamijeniti

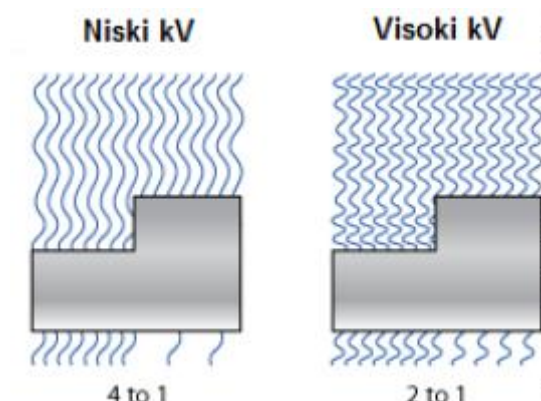
2.3. Karakteristike radiograma

U ovom poglavlju bit će objašnjeni osnovni pojmovi koji karakteriziraju radiograme. Govorit će se o kontrastu te oštini radiograma te o faktorima koji utječu na njih. Prilikom izrade radiograma cilj je proizvesti prikaz s maksimalnim stupnjem detaljnosti. To zahtijeva precizno kontroliranje većeg broja parametara koji mogu utjecati na kvalitetu radiograma. Radiografska osjetljivost je mjera kvalitete radiograma u smislu mogućnosti uočavanja najmanjeg detalja ili diskontinuiteta koji mogu biti uočeni. Na radiografsku osjetljivost utječu dvije skupine varijabli. Jedna skupina varijabli utječe na kontrast, a druga na oštrinu radiograma. Radiografski kontrast predstavlja razliku u zacrnjenju između dva različita područja radiograma. Što je veći kontrast na radiogramu to je lakše uočiti određena područja koja nas zanimaju.

Kontrast između dva dijela radiograma je ono što formira sliku te s većim kontrastom razne značajke radiograma postaju vidljivije, odnosno veća količina informacija je pohranjena u radiogramu. Radiografski kontrast ima dva osnovna utjecajna faktora.

Prvi faktor je kontrast objekta. To je odnos intenziteta radijacije koja je prošla kroz različita područja objekta. Ona ovisi o apsorpcijskoj razlici u objektu, valnoj duljini primarne radijacije te intenzitetu i distribuciji sekundarne radijacije nastale uslijed raspršenja snopa. Može se zaključiti da je veća razlika u debljini dijelova objekata na radiogramu prikazana većim kontrastom. Također je moguće dobiti različiti kontrast istog objekta snimanog na različitim energijama. Ako se objekt snima s manjim energijama dobiveni radiogram će imati veći kontrast. Do toga dolazi zbog činjenice da se radijacija manje energije lakše apsorbira u materijalu. Zbog toga će odnos fotona koji prođu kroz deblji i tanji dio radiograma biti veći na manjim energijama. U konačnici to će rezultirati sa činjenicom da će dijelovi fosforescentnog

sloja u pločama biti izloženi višem i nižem stupnjem zračenja. Razlika u snimanju istog objekta s višim i nižim energijama je prikazana na slici 8.



Slika 9 Transmisija na različitim energijama [6]

Neki od utjecajnih faktora na radiografski kontrast su sljedeći:

- razlike u debljini pojedinih dijelova objekta;
- razlika u materijalu pojedinih dijelova objekta;
- valna duljina primarne radijacije;
- sekundarna radijacija od disperzije;
- tip ploče na koju se vrši snimanje;
- korištenje filtra.

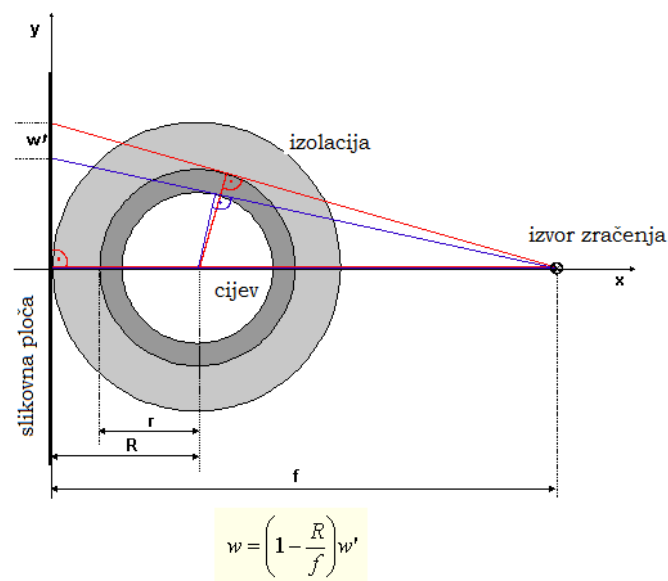
Kontrast slikovne ploče se odnosi na razliku u zacrtnjenju do koje dolazi zbog vrste korištene ploče te načinu na koji je ploča izložena zračenju. Kako je već spomenuto obični filmovi imaju eksponencijalnu karakterističnu krivulju dok slikovne ploče koje se koriste kod sustava za računalnu radiografiju imaju gotovo linearnu karakterističnu krivulju. Kako je ovaj dio detaljnije objašnjen u odlomku o svojstvima slikovne ploče ovdje neće biti detaljno obrađen. Radiografska oštrina je oštrina s kojom se prelazi iz jednog područja radiograma u drugo područje. Ova varijabla predstavlja razinu vjernosti vizualne reprodukcije stvarnog predmeta. Kada je niska oštrina područje na granici između dva djela radiograma će biti zamućeno, odnosno dolazi do postepenog prijelaza iz jednog djela radiograma u drugi dio. Na radiografsku oštrinu utječe nekoliko različitih varijabli. Neke od njih su:

- veličina izvora zračenja;
- udaljenost izvora do ploče;
- udaljenost uzorka do ploče;

- eventualno kretanje objekta za vrijeme snimanja;
- kut između izvora i objekta;
- oštrina promjena u debljini uzorka.

2.4. Postojeće metode snimanja

Postoji nekoliko metoda snimanja koje se trenutno koriste u praksi ispitivanja cijevi. Mjerenje debljine stijenke radiografijom temelji se na interpretaciji projekcija sjena na radiogramu, tj. zacrnjenja. Razlike u zacrnjenju nastaju kao razlike intenziteta piksela. Metoda radiografske projekcije duže se vrijeme koristi za ispitivanje cijevi i sličnih objekata na kojima se interpretacija bazira na procjeni zacrnjenja. U tradicionalnoj tangencijalnoj metodi procjene debljine stijenke, udaljenost rubnih linija projiciranih zacrnjenja stijenke cijevi na slikovnu ploču je direktna mjera debljine stijenke. Korištenjem tehnologije slikovnih ploča otvorene su dodatne mogućnosti za računalne algoritme i naknadnu obradu slike. Tangencijalnom tehnikom omogućeno je mjerenje, primjerice utjecaja korozije, duž cijevi gdje god se nalazila. Međutim, kako bi se omogućio pristup promatranom dijelu u kojem očekujemo nepravilnost, potrebno je procijeniti dozu radijacije tako da bude proporcionalna sa senzorom na kojem će se napraviti snimak. Iz tog razloga u ovoj metodi potrebno je napraviti kalibraciju tako da relativna promjena intenziteta bude direktno povezana s promjenom debljine stijenke. Potreba za kalibracijom jedna je od glavnih nedostataka ove metode budući da pogrešnom kalibracijom značajno utječemo na točnost rezultata. Nužno je dodati da se kod tangencijalne tehnike snimanja javlja prirast debljine zbog položaja izvora zračenja. U nastavku slika 10 prikazuje prirast debljine za tangencijalnu tehniku snimanja. [8]



Slika 10 Prirast debljine kod tangencijalne tehnike [8]

2.4.1. Metoda tangencijalne projekcije

Metoda tangencijalne projekcije temelji se na korištenju slikovnih ploča. Prednost ove metode je samo korištenje slikovnih ploča zbog visoke osjetljivosti te mogućnosti automatizacije obrade slike osigurane digitalnim očitanjem. Istraživanja su pokazala da slikovne ploče mogu postići gotovo jednake oštine kao i film. Ispitivanje radiografijom smatra se jednom od mogućih metoda tlačnog ispitivanja petrokemijskih instalacija. Glavna prednost ove metode je u tome što ispitivanje ne zahtijeva zaustavljanje rada postrojenja. Druge metode nerazornih ispitivanja, primjerice ultrazvučno ispitivanje, mogu se koristiti zajedno uz ovu metodu. [8]

2.4.2. Računalna procjena debljine stijenke

Procjena debljine stijenke pomoću računala bazira se na procjeni presjeka uzduž promjer cijevi. Grafički se prikazuje presjek cijevi te se krivuljom aproksimira. Pozadina ove metode nalazi se u jednostavnom slaganju aproksimirane funkcije s rezultatima Monte Carlo kalkulacije za ove geometrijske postavke. [8]

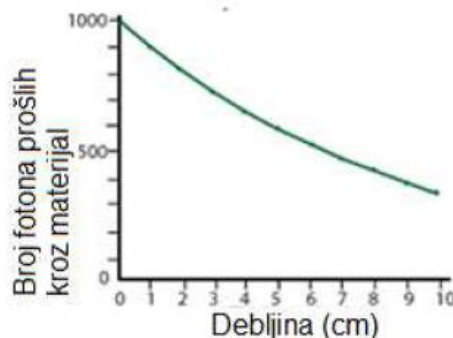
2.4.3. Procjena korozije lokalnim promjenama intenziteta

Metoda radiografske projekcije ima široku upotrebu u ispitivanju cijevi i praćenju korozije. Ova metoda omogućava direktan pristup lokalnim varijacijama intenziteta uz pomoć računalnog softwera. Metoda se temelji na Roseovom modelu prolaska zračenja gdje koeficijent apsorpcije ovisi o energiji zračenja. Moguće je odrediti promjene u debljini materijala, ali ne i apsolutnu debljinu. [8]

2.5. Osnove izračuna linearnog i masenog koeficijenta prigušenja

U ovom dijelu rada bit će opisane teorijske osnove odnosa između broja fotona koji prođu kroz objekt i debljine objekta te značaj linearnog i masenog koeficijenta prigušenja. Kada se X-zrake usmjere u određeni predmet dio fotona dolazi u interakciju sa česticama materijala toga predmeta te se njihova energija rasipa ili apsorbira. Ta pojava naziva se prigušenje. Drugi fotoni nesmetano prolaze kroz materijal bez interakcije sa česticama materijala. Broj fotona koji prođu kroz materijal ovisi o debljini, atomskom broju materijala te naravno o energiji individualnih fotona. Kada imaju jednake energije fotoni prolaze različite udaljenosti kroz materijal zbog vjerojatnosti da će doći u interakciju s nekom od čestica materijala te tipom interakcije. Kako vjerojatnost interakcije s povećanjem udaljenosti koju foton prijeđe sve više raste, tako se broj fotona koji dođu do određene udaljenosti u materijalu eksponencijalno smanjuje s prijašnjom udaljenošću. Primjerice, ako tisuću fotona usmjerimo u sloj materijala debljine 1 cm, uz vjerojatnost apsorpcije 10%, znači da 100 fotona neće proći kroz sloj. To ostavlja 900 fotona koji ulaze u sljedeći sloj koji ne prođe idućih 10% fotona.

Ubrzo postaje očit eksponencijalan izgled krivulje koja opisuje ovu pojavu što možemo vidjeti na slici 11.



Slika 11 Odnos broja fotona koji prođu kroz materijal i debljine materijala [6]

Jednadžba (1) opisuje krivulju prikazanu na slici broj 11.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1) \text{ gdje su:}$$

- I - intenzitet fotona nakon što su prošli kroz određenu debljinu x materijala;
- I_0 - početni intenzitet fotona;
- μ - linearni koeficijent prigušenja;
- x - udaljenost koju je zraka prošla kroz materijal.

Koeficijent koji određuje količinu fotona koja neće proći kroz sloj materijala je linearni koeficijent prigušenja. Gornja formula se dobije na način opisan u daljnjem tekstu te će ona predstavljati osnovu za određivanje koeficijenta linearnog prigušenja te nekih drugih koeficijenata i veličina o kojima će biti više riječi u daljnjem tekstu. Ako se zamisli uska zraka fotona jednake energije promjena intenziteta te zrake na određenoj dubini u materijalu se može izraziti prema jednadžbi (2).

$$dI(x) = -I(x) \cdot n \cdot \sigma \cdot dx \quad (2) \text{ gdje je}$$

- dI - promjena u intenzitetu;
- I - početan intenzitet;
- n - broj atoma po cm^3 ;
- σ - konstanta proporcionalnosti koja definira ukupnu vjerojatnost da pojedini foton bude skrenut s putanje ili apsorbiran;
- dx - diferencijalno mala debljina materijala kroz koju je prošla zraka.

Kada se ta jednađžba integrira ona postaje:

$$I = I_0 e^{-n\sigma x} \quad (3)$$

U jednađžbi (3) uobičajeno je da se broj atoma po cm^3 (n) te konstanta proporcionalnosti (σ) kombiniraju u linearni koeficijent prigušenja (μ). Nakon te zamjene gornja jednađžba poprima oblik jednađžbe (1). Linearni koeficijent prigušenja se definira kao dio X-zraka ili gama zraka koje su apsorbirane ili raspršene po jediničnoj debljini materijala. Ovaj koeficijent uzima u obzir broj atoma u kubičnom metru materijala te vjerojatnost da foton bude apsorbiran ili skrenut s putanje prilikom udara u jezgru ili elektron atoma. Kada se govori o koeficijentima prigušenja nužno je spomenuti maseni koeficijent prigušenja.

Maseni koeficijent se određuje prema sljedećoj formuli:

$$\mu_m = \mu / \rho \quad [\text{cm}^2/\text{g}] \quad (4) \text{ gdje je}$$

- μ - linearni koeficijent prigušenja;
- μ_m - maseni koeficijent prigušenja;
- ρ - gustoća materijala.

Ovaj koeficijent je značajan jer se njime uzima u obzir gustoća materijala te ga je ponekad jednostavnije koristiti.

3. Opis praktičnog dijela rada

U praktičnom dijelu rada bit će razrađena procjena stanjenja stijenke pomoću računalne radiografije. Na početku će biti napravljena teorijska analiza odnosa intenziteta piksela i debljine materijala za različite energije. Nakon teorijske razrade bit će izvršeno nekoliko setova snimanja. Prvi set snimanja izvršit će se na 4 različita stepeničasta uzorka s točno određenim parametrima snimanja. Temeljem analize intenziteta piksela stepeničastih uzoraka bit će napravljene kalibracijske krivulje na temelju kojih će se izraditi odgovarajući matematički model. Usporedbom tako dobivenih krivulja bit će napravljena detaljna analiza istih. U drugom setu bit će sniman ispitni uzorak cijevi s parametrima snimanja jednakim onima za snimanje stepeničastih uzoraka kako bi se mogla izvršiti usporedba i daljnja analiza. Analizirat će se intenziteti piksela za područje od interesa ispitne cijevi te korištenjem ranije dobivenog matematičkog modela računati odstupanja od izmjerenih vrijednosti. U trećem setu snimanja, na istoj slikovnoj ploči snimat će se stepeničasti uzorak i ispitni uzorak cijevi kako bi se eventualni utjecaji snimanja i sustava za očitavanje slike poništili te će ponovo biti izvršena analiza i izračunata odstupanja od izmjerenih vrijednosti. U četvrtom setu snimanja, na istoj slikovnoj ploči snimat će se stepeničasti uzorak i ispitni uzorak cijevi zakrenut oko svoje osi kako bi se utvrdilo postoje li dodatna odstupanja zbog prirasta debljine te će biti izvršena analiza i izračunata odstupanja od izmjerenih vrijednosti. Na temelju svih provednih analiza odstupanja izračunatih i izmjerenih vrijednosti, zaključno će biti kritički komentirane mogućnosti i ograničenja cRT-a za navedenu primjenu.

4. Praktični dio

4.1. Teorijski prikaz odnosa intenziteta piksela i debljine materijala

Koristeći jednadžbu (1) za energije $U_1=100\text{kV}$, $U_2=150\text{kV}$ i $U_3=200\text{kV}$ te redom linearne koeficijente prigušenja koji proizlaze iz navedenih energija $\mu_{100\text{kV}} = 2,93\text{cm}^{-1}$, $\mu_{150\text{kV}} = 1,54\text{cm}^{-1}$ i $\mu_{200\text{kV}} = 1,14\text{cm}^{-1}$ i izmjerene debljine materijala navedenih u tablici 1, tablici 2 i tablici 3 dobiveni su rezultati navedeni u svakoj od tablica, izraženi kao omjer zacrnjenja I i I_0 , gdje je I intenzitet fotona nakon što su prošli kroz određenu debljinu X materijala, a I_0 početni intenzitet fotona. Debljine materijala su stvarno izmjerene debljine ispitnih stepeničastih uzoraka koje će biti korištene za daljnja snimanja u radu.

Tablica 1 Odnos I i I_0 pri $U=100\text{kV}$

Redni broj	Debljina X [cm]	I / I_0
1.	0,1	0,7460
2.	0,2	0,5565
3.	0,3	0,4151
4.	0,4	0,3097
5.	0,5	0,2310
6.	0,6	0,1723
7.	0,7	0,1286
8.	0,8	0,0959
9.	0,9	0,0715
10.	1	0,0533
11.	1,64	0,0081
12.	1,76	0,0057
13.	1,88	0,0040
14.	2	0,0028
15.	2,12	0,0020
16.	2,4	0,0008
17.	2,9	0,0002

Tablica 2 Odnos I i I_0 pri $U=150\text{kV}$

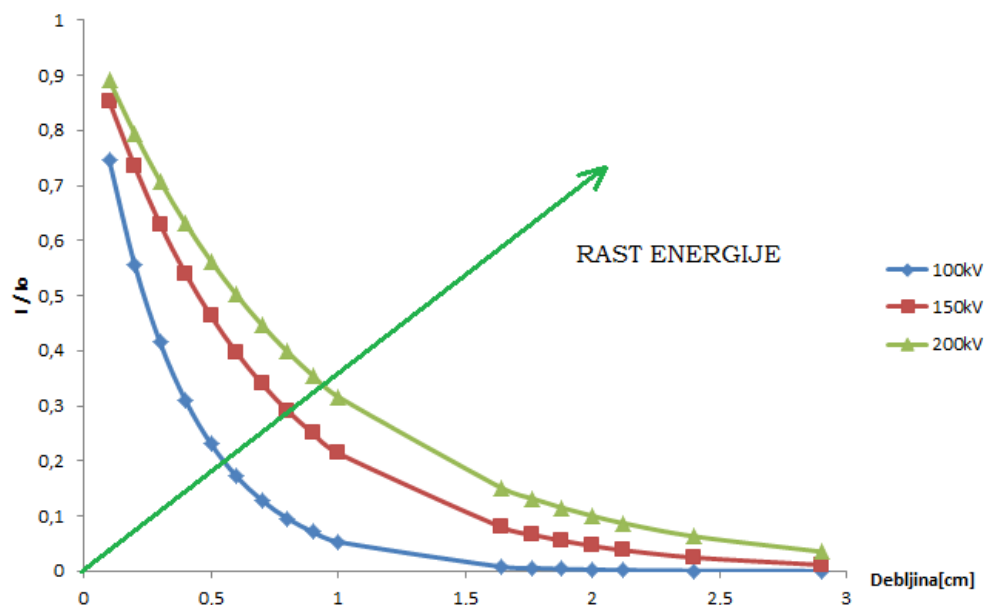
Redni broj	Debljina X [cm]	I / I_0
1.	0,1	0,8527
2.	0,2	0,7349
3.	0,3	0,6300
4.	0,4	0,5401
5.	0,5	0,4630
6.	0,6	0,3969
7.	0,7	0,3402
8.	0,8	0,2917
9.	0,9	0,2507
10.	1,0	0,2143
11.	1,64	0,0801
12.	1,76	0,0665
13.	1,88	0,0552
14.	2	0,0459
15.	2,12	0,0382
16.	2,4	0,0248
17.	2,9	0,0114

Tablica 3 Odnos I i I_0 pri $U=200\text{kV}$

Redni broj	Debljina X [cm]	I / I_0
1.	0,1	0,8914
2.	0,2	0,7945
3.	0,3	0,7083
4.	0,4	0,6313
5.	0,5	0,5628
6.	0,6	0,5016
7.	0,7	0,4472
8.	0,8	0,3986
9.	0,9	0,3553
10.	1	0,3167
11.	1,64	0,1517
12.	1,76	0,1322
13.	1,88	0,1151
14.	2	0,1003
15.	2,12	0,0874
16.	2,4	0,0633
17.	2,9	0,0355

Temeljem tablice 1, tablice 2 i tablice 3 dobiven je dijagram prikazan na slici 12. Na slici 12 vidljivo je da su krivulje eksponencijalnog karaktera. Porastom energije smanjuje se pad krivulje te je prikazano kako rast energije utječe na iste. Ovaj grafički prikaz predstavlja idealan slučaj prolaska zračenja različitih energija kroz određenu materiju. U stvarnosti, krivulje dobivene mjerenjem prolaska zračenja na senzoru će se razlikovati zbog

karakteristika odaziva senzora i sustava za učitavanje slike, softverskih algoritama kod analogno digitalne konverzije, sekundarnog i povratnog zračenja, build up faktora i sl.



Slika 12 Odnos zacrnjenja I i I_0 za navedene energije

4.2. Snimanje stepeničastih ispitnih uzoraka

Slike koje slijede u nastavku prikazuju proces snimanja stepeničastog uzorka. Prilikom snimanja korištena je slikovna ploča Kodak Industrex GP na koju je postavljen stepeničasti uzorak poznatih debljina i materijala. Određena je udaljenost izvora zračenja $l=700\text{mm}$, vidljiva na slici 14, spušten teleskopski nastavak za centriranje vidljiv na slici 13 te određeni parametri snimanja. Stepeničasti uzorak postavljen je u centar rendgenskog snopa kako bi se minimizirao utjecaj prirasta debljine.



Slika 13 Centriranje izvora zračenja



Slika 14 Mjerenje udaljenosti izvora zračenja

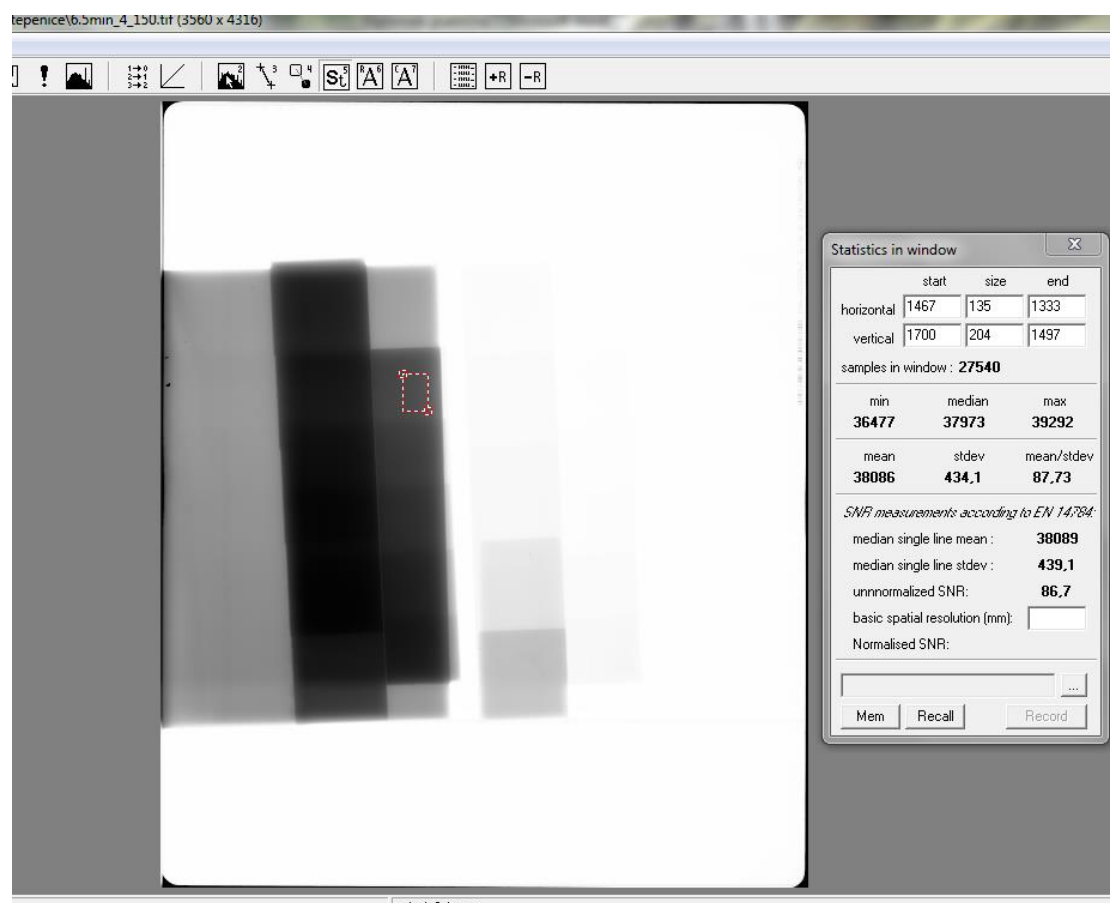
Podaci u tablicama koje slijede nastali su kao produkt pet snimanja. Izvršena su snimanja sa sljedećim parametrima:

1. Snimanje u trajanju $t=10\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=150\text{kV}$.
2. Snimanje u trajanju $t=6,5\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=150\text{kV}$.
3. Snimanje u trajanju $t=2\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=200\text{kV}$.
4. Snimanje u trajanju $t=1\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=250\text{kV}$.
5. Snimanje u trajanju $t=3,5\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=175\text{kV}$.

Udaljenost izvora zračenja iznosila je $l=700\text{mm}$ za svih pet snimanja te nisu korištene radiografske folije. Skeniranje slikovne ploče izvršeno je na uređaju za skeniranje VMI5100MS, rezolucije skeniranja $100\text{ }\mu\text{m}$, snage lasera 15 J/m^2 i napona na multiplikatoru $\text{PMT}=5,25\text{V}$. Slike su eksportirane u 16 bit .tiff formatu kako ne bi došlo do gubitka podataka prilikom konverzije.

4.3. Mjerenje intenziteta piksela stepeničastih ispitnih uzoraka

Slika 15 prikazuje proces vršenja mjerenja intenziteta piksela. Mjerenja intenziteta piksela izvršena su u programu ISee!. Prilikom mjerenja područja od interesa, odabirom područja bližih centru zračenja, smanjen je utjecaj prirasta debljine.



Slika 15 Mjerenje intenziteta piksela na ispitnom stepeničastom uzorku

U nastavku slijede tablice s izmjerenim intenzitetima piksela I na području od interesa digitalnog radiograma, te omjeri $I / I_{\text{ploče}}$, gdje je I izmjereni intenzitet piksela na području od interesa, a $I_{\text{ploče}}$ izmjereni intenzitet piksela ploče.

Tablica 4 Intenziteti piksela pri 10min_4mA_150kV

Redni broj	Debljina x [mm]	Intenzitet piksela I	I/I _{ploče}
1.	1	52741	0,9988
2.	2	52710	0,9987
3.	3	52674	0,9980
4.	4	52590	0,9964
5.	5	52440	0,9936
6.	6	52609	0,9968
7.	7	52579	0,9962
8.	8	52448	0,9937
9.	9	52310	0,9911
10.	10	51768	0,9809
11.	16,4	40567	0,7686
12.	17,6	39361	0,7458
13.	18,8	38469	0,7289
14.	21,2	37281	0,7064
15.	24	35221	0,6673
16.	29	35008	0,6633

$$I_{\text{ploče}}=52776$$

Tablica 5 Intenziteti piksela pri 6,5min_4mA_150kV

Redni broj	Debljina x [mm]	Intenzitet piksela I	I/I _{ploče}
1.	1	54412	0,9996
2.	2	54372	0,9988
3.	3	54296	0,9974
4.	4	54076	0,9934
5.	5	53800	0,9883
6.	6	54068	0,9932
7.	7	54056	0,9928
8.	8	53866	0,9895
9.	9	52148	0,9580
10.	10	48716	0,8949
11.	16,4	37645	0,6915
12.	17,6	36321	0,6672
13.	18,8	34921	0,6415
14.	21,2	33132	0,6086
15.	24	32713	0,6009
16.	29	31626	0,5810

$$I_{\text{ploče}}=54433$$

Tablica 6 Intenziteti piksela pri 2min_4mA_200kV

Redni broj	Debljina x [mm]	Intenzitet piksela I	I/I _{ploče}
1.	1	51274	0,9994
2.	2	51242	0,9988
3.	3	51156	0,9971
4.	4	51018	0,9944
5.	5	50806	0,9903
6.	6	51094	0,9959
7.	7	50991	0,9939
8.	8	50861	0,9914
9.	9	49944	0,9735
10.	10	48893	0,9530
11.	16,4	38082	0,7423
12.	17,6	36924	0,7197
13.	18,8	35407	0,6901
14.	21,2	33567	0,6543
15.	24	29648	0,5779
16.	29	27630	0,5385

$I_{\text{ploče}}=51301$

Tablica 7 Intenziteti piksela pri 1min_4mA_250kV

Redni broj	Debljina x [mm]	Intenzitet piksela I	I/I _{ploče}
1.	1	52668	0,9997
2.	2	52613	0,9986
3.	3	52501	0,9965
4.	4	52369	0,9940
5.	5	52087	0,9886
6.	6	52422	0,9950
7.	7	52345	0,9935
8.	8	52236	0,9915
9.	9	51465	0,9768
10.	10	50266	0,9541
11.	16,4	40432	0,7674
12.	17,6	39552	0,7507
13.	18,8	38134	0,7238
14.	21,2	36400	0,6909
15.	24	32437	0,6157
16.	29mm	29906	0,5676

$I_{\text{ploče}}=52683$

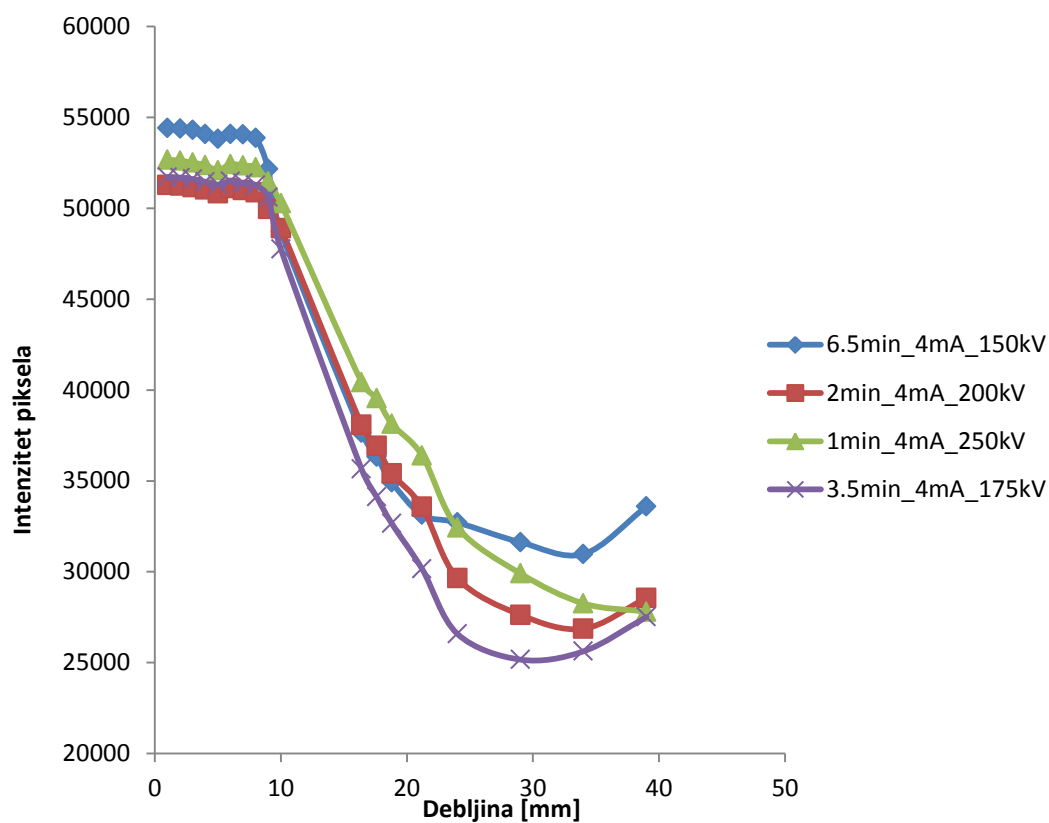
Tablica 8 Intenziteti piksela pri 3.5min_4mA_175kV

Redni broj	Debljina x [mm]	Intenzitet piksela I	I/I _{ploče}
1.	1	51715	0,9993
2.	2	51683	0,9987
3.	3	51601	0,9971
4.	4	51454	0,9942
5.	5	51298	0,9912
6.	6	51487	0,9949
7.	7	51380	0,9928
8.	8	51264	0,9906
9.	9	50604	0,9778
10.	10	47742	0,9225
11.	16,4	35644	0,6887
12.	17,6	34120	0,6593
13.	18,8	32650	0,6309
14.	21,2	30159	0,5827
15.	24	26586	0,5137
16.	29	25169	0,4863

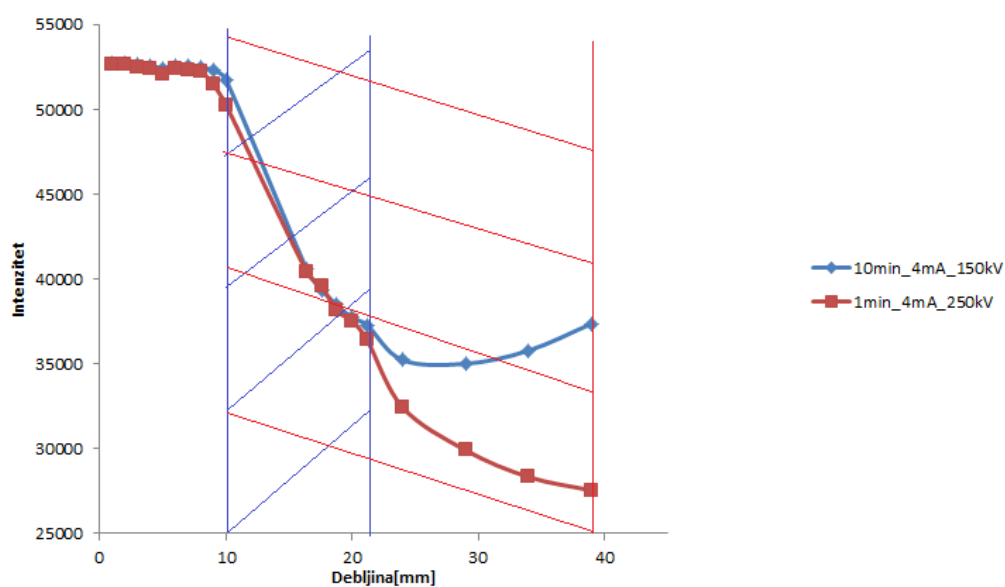
$$I_{\text{ploče}}=51750$$

4.3.1. Grafički prikaz ovisnosti intenziteta piksela i debljine materijala

Iz tablice 5, tablice 6, tablice 7 i tablice 8 napravljen je grafički prikaz slika 16. ovisnost intenziteta piksela I i debljine materijala X. Na grafu je vidljivo da za debljine od 10mm dolazi do zasićenja te je mogućnost preciznog mjerenja nije moguća. Također je vidljivo da je najveće zacrnjenje postignuto pri energiji $U=250\text{kV}$, a što je teoretski prikazano na slici 10. U središnjem dijelu grafa, za debljine materijala od 10mm do 25mm vidljiv je strmiji pad krivulje koji je okarakteriziran kao područje od interesa te će kasnije biti detaljnije analizirano. U tom području nalazi se optimalno područje za vršenje procjene debljine stijenke pomoću razlike u intenzitetu piksela. Za debljine od 25mm nadalje u rubnim točkama vidljivo je da dolazi do tako zvanog build up faktora. Build up faktor je definiran kao omjer promatranog zračenja i očekivanog primarnog zračenja zanemarujući višestruka raspršenja te kao posljedica nastaje povećano zacrnjenje u odnosu na očekivano. Ulaskom u područje build up faktora izlazimo iz područja od interesa te ćemo podatke iz toga područja u daljnoj analizi odbaciti.



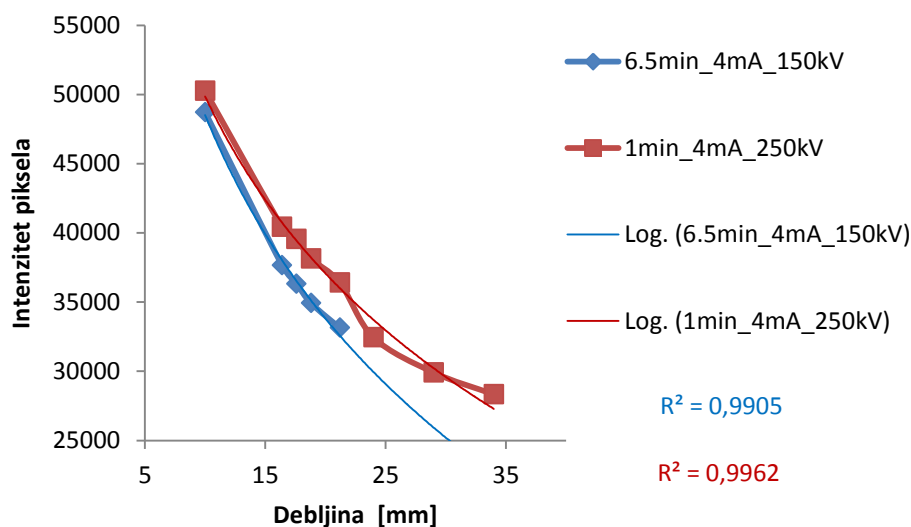
Slika 16 Ovisnost intenziteta i debljine materijala



Slika 17 Odabir područja od interesa

Na slici 17. odabrano je područje od interesa koje će se koristiti u daljoj analizi. Kao što je ranije navedeno, područje od interesa je područje s najvećom preciznošću. Vidljivo je da se područja od interesa za različite energije razlikuju u širini područja tj. u razlici debljina. Šire

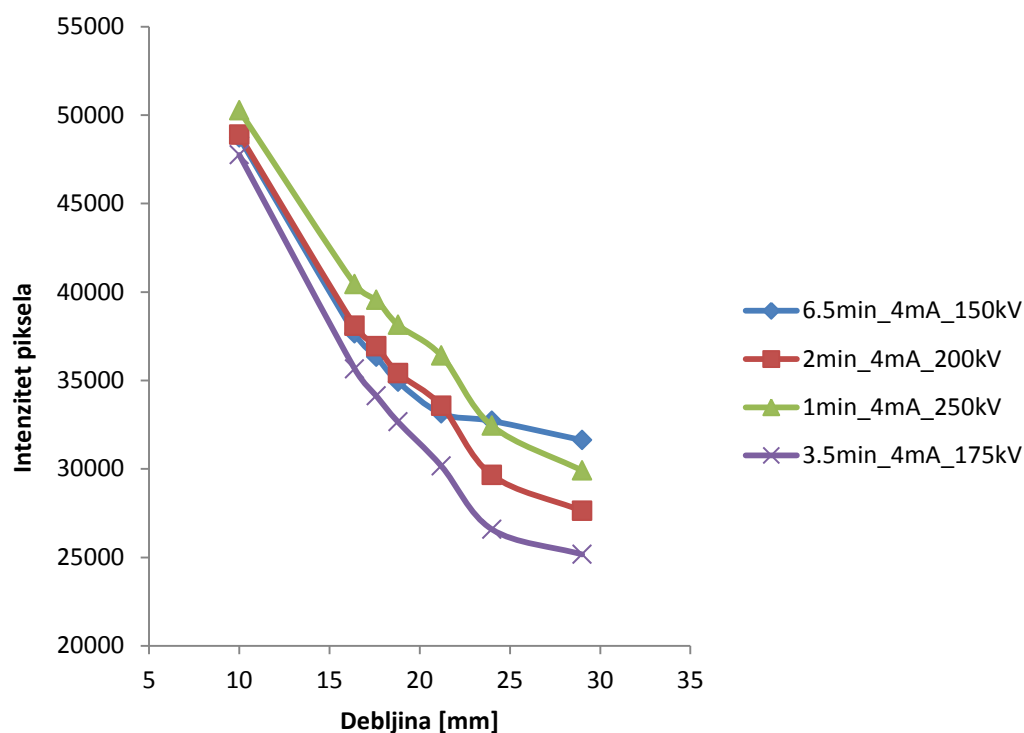
područje osigurava veći raspon bez negativnih utjecaja te manja ograničenja u ekspoziciji. Područje od interesa za energiju $U=150\text{kV}$ nalazi se za debljine od 10mm do 26mm. Podaci za debljine manje od 10mm i veće od 26mm su odbačeni. Podaci za debljine manje od 10mm odbačeni su zbog vidljivog zasićenja te iz tog razloga nisu pogodni za daljnu analizu, dok za podatke veće od 26mm postoji značajan utjecaj build up faktora te ih iz tog razloga ne koristimo u daljnoj analizi. Područje od interesa za energiju $U=250\text{kV}$ nalazi se za debljine od 10mm do 38mm. Podaci za debljine manje od 10mm odbačeni su jer, zbog vidljivog zasićenja, nisu pogodni za daljnju analizu. U nastavku rada podaci iz područja od interesa bit će dodatno analizirani, a dobiveni rezultati prokomentirani.



Slika 18 Analiza područja od interesa

Iz slike 18. analize područja od interesa za navedene energije vidljivo je da logaritamske funkcije aproksimiraju dobivene krivulje za područje od interesa što će u daljnoj analizi biti korišteno za izradu matematičkog modela.

U nastavku sljedeći slika 19. koja grafički prikazuje ovisnost intenziteta piksela o debljini materijala aproksimirana logaritamskom funkcijom te opisana matematičkim modelom za područje od interesa. Aproksimacija logaritamskom funkcijom te izrada matematičkog modela omogućena je ranije navedenim izborom područja od interesa tj. odbacivanjem točaka u kojima je uočen utjecaj zasićenja te build up faktora.



Slika 19 Ovisnost intenziteta i debljine materijala aproksimirano logaritamskom funkcijom

Krivulja dobivena snimanjem u trajanju $t=6,5\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=150\text{kV}$ aproksimirana je logaritamskom funkcijom a funkcija koja opisuje krivulju glasi

$$y = -16539 \ln(x) + 84877.$$

Krivulja dobivena snimanjem u trajanju $t=2\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=200\text{kV}$ aproksimirana je logaritamskom funkcijom a funkcija koja opisuje krivulju glasi

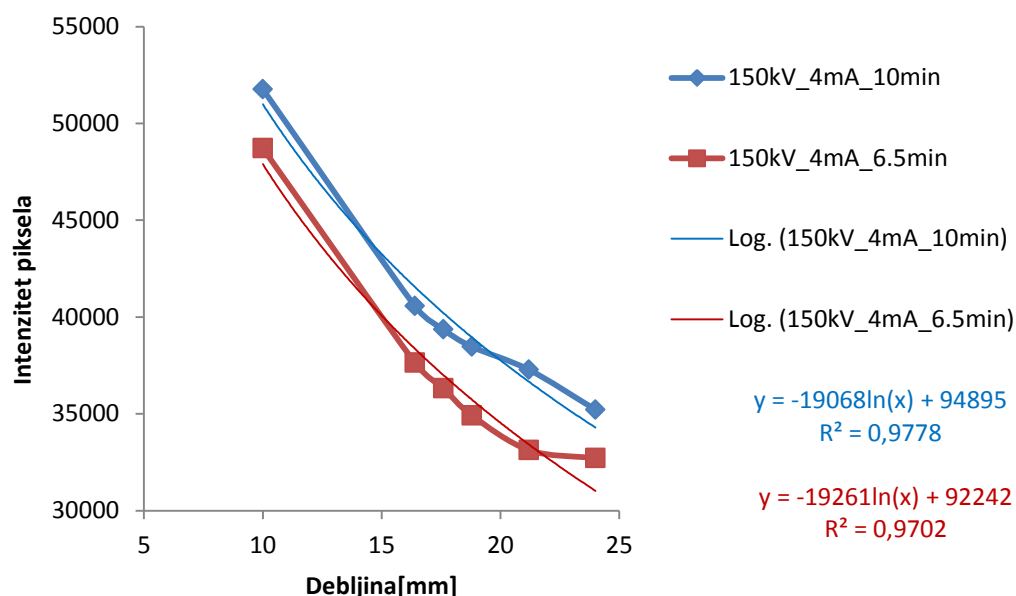
$$y = -20439 \ln(x) + 95596.$$

Krivulja dobivena snimanjem u trajanju $t=1\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=250\text{kV}$ aproksimirana je logaritamskom funkcijom a funkcija koja opisuje krivulju glasi

$$y = -19364 \ln(x) + 94874.$$

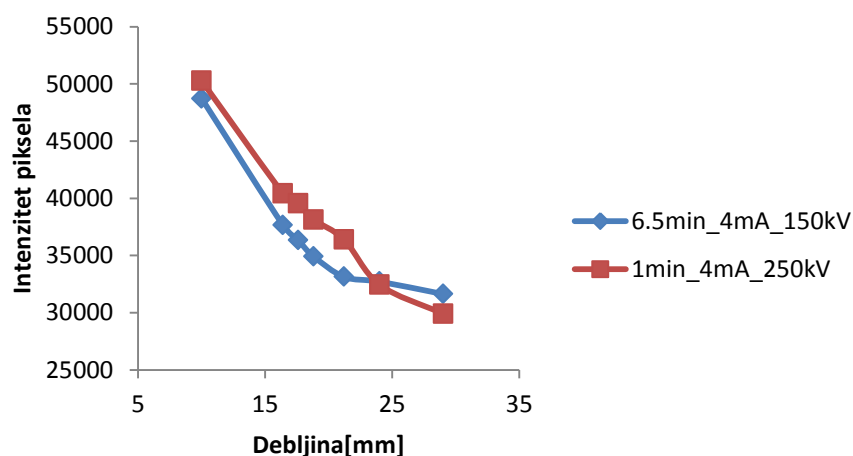
Krivulja dobivena snimanjem u trajanju $t=3,5\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=175\text{kV}$ aproksimirana je logaritamskom funkcijom a funkcija koja opisuje krivulju glasi

$$y = -22009 \ln(x) + 97610.$$



Slika 20 Usporedba intenzitet-debljina za iste energije i različito vrijeme ekspozicije

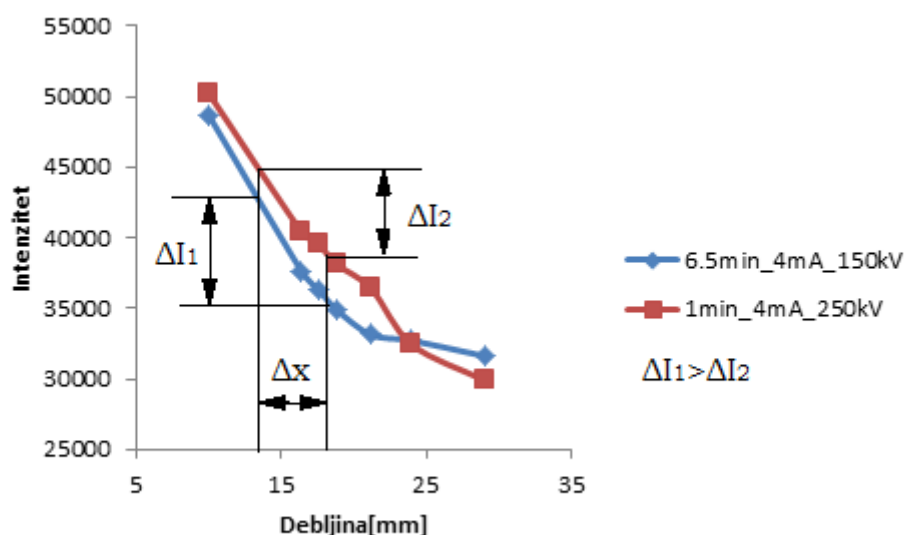
Na slici 12 vidljivo je da je nagib krivulja približno isti odnosno da se krivulje međusobno prate, međutim da je za vremenski dužu ekspoziciju linija pomaknuta prema gore, pa se u području od interesa postižu nešto veća zacrtnjenja za iste debljine. Iz toga možemo zaključiti da kontrast ne ovisi o vremenu ekspozicije, dok zacrtnjenje ovisi budući da se koeficijent atenuacije ne mijenja jer on ovisi isključivo o energiji zračenja i materijalu.



Slika 21 Usporedba intenziteta i debljine materijala za različite energije

Slika 21 prikazuje usporedbu intenziteta piksela i debljine materijala za različite energije tj. ekspozicije. Uslijed promjene energija snimanja došlo je do promjene u nagibu krivulja zbog različitog linearnog koeficijenta prigušenja.

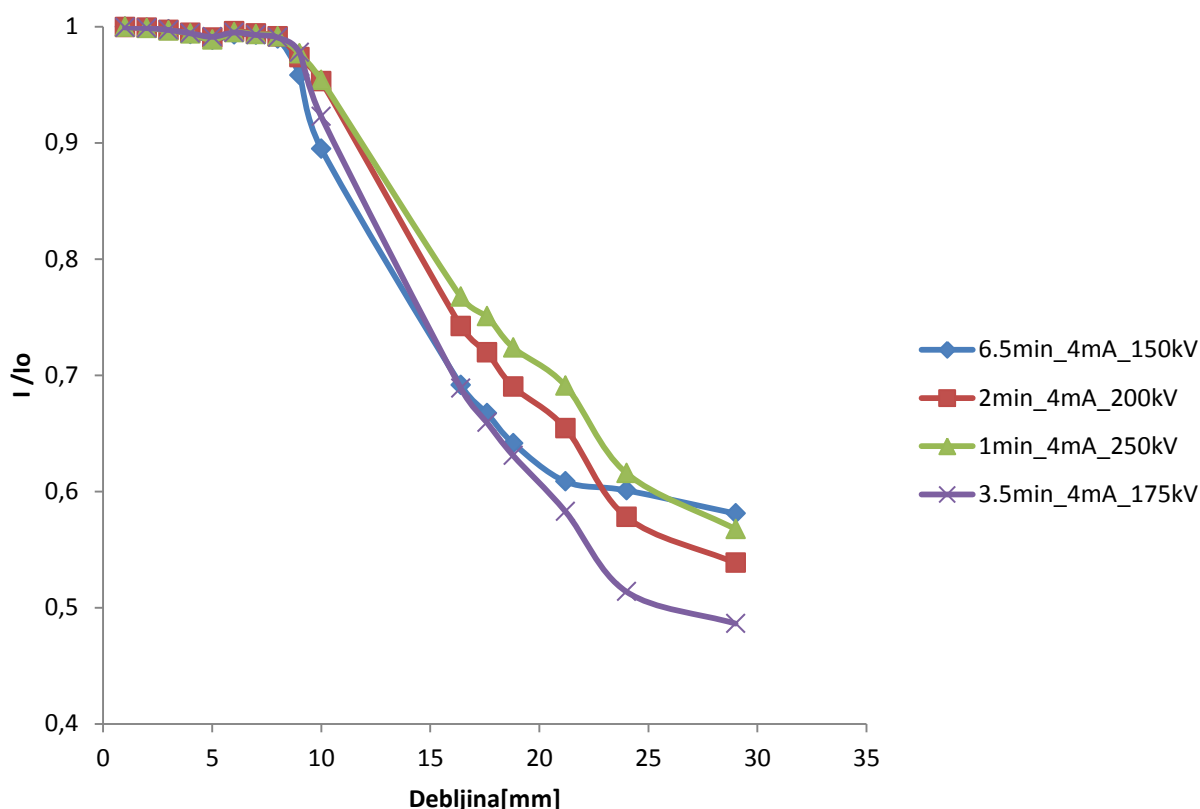
Na slici 22 primjeru usporedbe intenziteta i debljine za različite energije moguće je vidjeti na koji način se mijenja zacrnjenje za jednake promjene debljine. Kod niže energije krivulja je strmija što osigurava veću rezoluciju. Za jednaku razliku u debljini Δx u području od interesa niže energije dogodit će se veća promjena u zacrnjenju $\Delta I_1 > \Delta I_2$ te na taj način omogućiti veću preciznost.



Slika 22 Usporedba intenziteta i debljine za različite energije, primjer

4.3.2. Grafički prikaz ovisnosti omjera zacrnjenja I i I_0 te debljine materijala

Iz tablice 5, tablice 6, tablice 7 i tablice 8 napravljen je grafički prikaz slika 23. ovisnost omjera zacrnjenja I i I_0 , gdje je I intenzitet fotona nakon što su prošli kroz određenu debljinu X materijala, a I_0 početni intenzitet fotona te izmjerene debljine materijala X . Na grafu je vidljivo da za debljine od 10mm dolazi do zasićenja te mogućnost preciznog mjerenja nije moguća. Također je vidljivo da je najveće zacrnjenje postignuto pri energiji $U=250\text{kV}$, a što je teoretski prikazano na slici 10. U središnjem dijelu grafa, za debljine materijala od 10mm do 25mm vidljiv je strmiji pad krivulje koji je okarakteriziran kao područje od interesa te će kasnije biti detaljnije analizirano. U tom području nalazi se optimalno područje za vršenje procjene debljine stijenke pomoću razlike u intenzitetu piksela.

Slika 23 Ovisnost omjera zacrnjenja I i I_0 te debljine materijala

U nastavku slijedi slika 24. koja grafički prikazuje ovisnost omjera zacrnjenja I i I_0 te izmjerene debljine materijala X aproksimirana logaritamskom funkcijom i opisana matematičkim modelom za područje od interesa. Aproksimacija logaritamskom funkcijom te izrada matematičkog modela omogućena je ranije navedenim izborom područja od interesa tj. odbacivanjem točaka u kojima je uočen utjecaj zasićenja.

Krivulja dobivena snimanjem u trajanju $t=6,5\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=150\text{kV}$ aproksimirana je logaritamskom funkcijom a funkcija koja opisuje krivulju glasi

$$y = -0,304 \ln(x) + 1,5591.$$

Krivulja dobivena snimanjem u trajanju $t=2\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=200\text{kV}$ aproksimirana je logaritamskom funkcijom a funkcija koja opisuje krivulju glasi

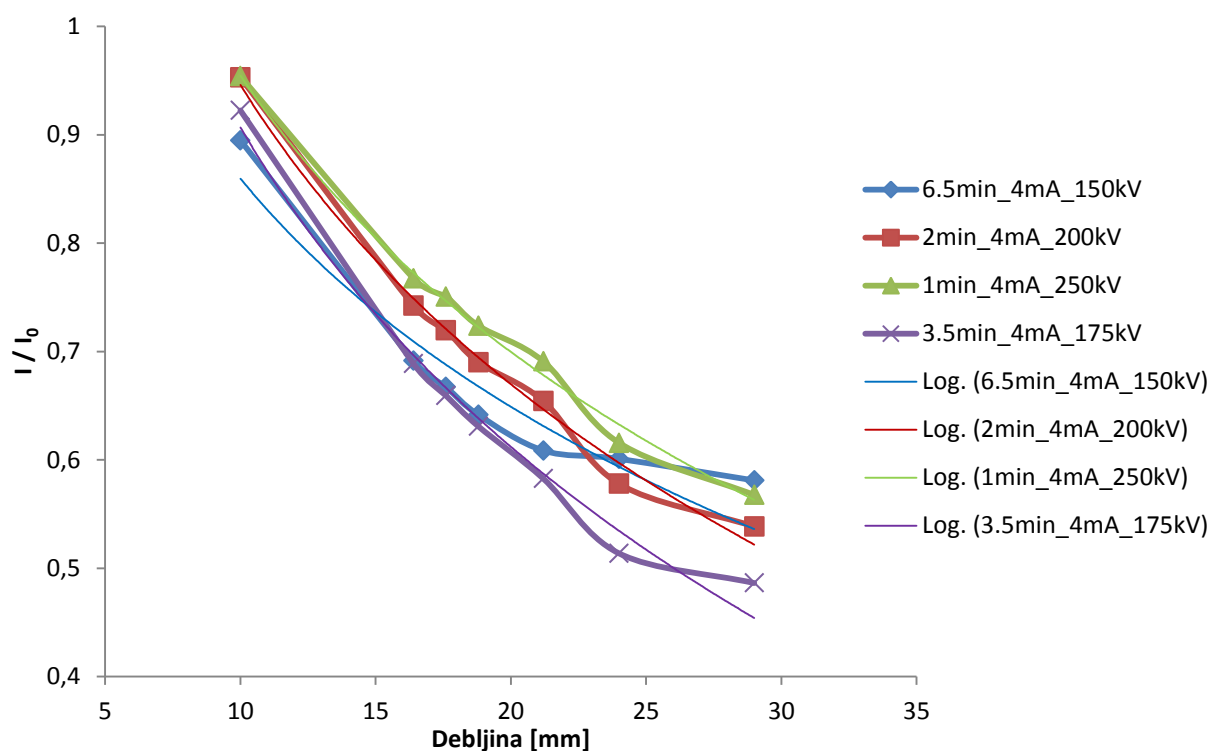
$$y = -0,398 \ln(x) + 1,8634.$$

Krivulja dobivena snimanjem u trajanju $t=1\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=250\text{kV}$ aproksimirana je logaritamskom funkcijom a funkcija koja opisuje krivulju glasi

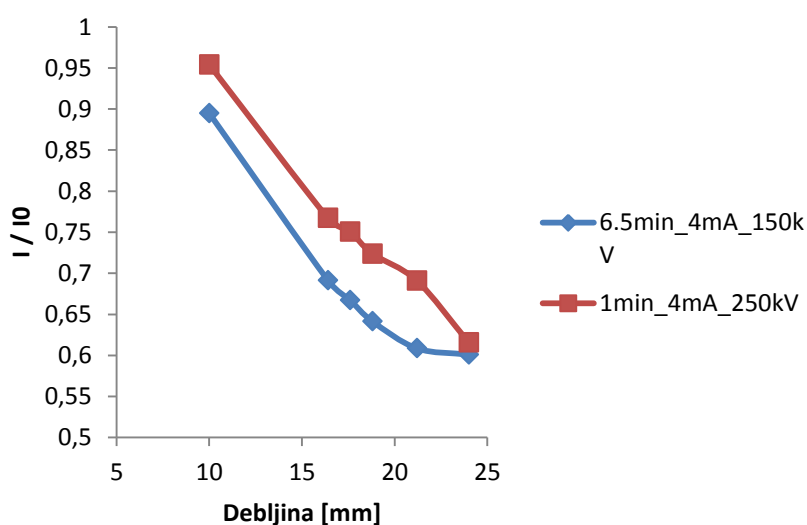
$$y = -0,368 \ln(x) + 1,8008.$$

Krivulja dobivena snimanjem u trajanju $t=3,5\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=175\text{kV}$ aproksimirana je logaritamskom funkcijom a funkcija koja opisuje krivulju glasi

$$y = -0,425 \ln(x) + 1,8861.$$



Slika 24 Ovisnost omjera zacrnjenja I i I_0 te izmjerene debljine materijala X aproksimirana logaritamskom funkcijom



Slika 25 Usporedba ovisnosti omjera zacrnjenja I i I_0 te izmjerene debljine materijala X za različite energije

Slika 25. prikazuje usporedbu ovisnosti omjera zacrnljenja I i I_0 te izmjerene debljine materijala X za različite energije. Uslijed promjene energija snimanja došlo je do promjene u nagibu krivulja zbog različitog linearnog koeficijenta prigušenja. Kod niže energije krivulja je strmija što osigurava veću rezoluciju. Za jednaku razliku u debljini Δx u području od interesa niže energije dogodila se veća promjena omjera zacrnljenja $\Delta I/I_0$ te je na taj način omogućena veća preciznost.

4.4. Snimanje ispitnog uzorka cijevi

Slike koje slijede u nastavku prikazuju ispitni uzorak cijevi na kojoj je izvršeno snimanje. Prilikom snimanja korištena je slikovna ploča Kodak Industrex GP na koju je postavljena ispitna cijev poznate debljine stijenke cijevi $x_c=8,2\text{mm}$, s provrtima u stijenci cijevi, koje su duboke redom 25%, 50%, 75% te 100% debljine stijenke cijevi. Određena je udaljenost izvora zračenja $l=700\text{mm}$, izvršeno centriranje ispitne cijevi te određeni parametri snimanja. Ispitna cijev postavljena je u centar rendgenskog snopa kako bi se minimizirao utjecaj prirasta debljine. Na slici 26 prikazan je ispitni uzorak cijevi s provrtima.



Slika 26 Ispitni uzorak cijevi s provrtima

Podaci u tablicama koje slijede nastali su kao produkt niže navedenih snimanja. Izvršena su snimanja sa sljedećim parametrima:

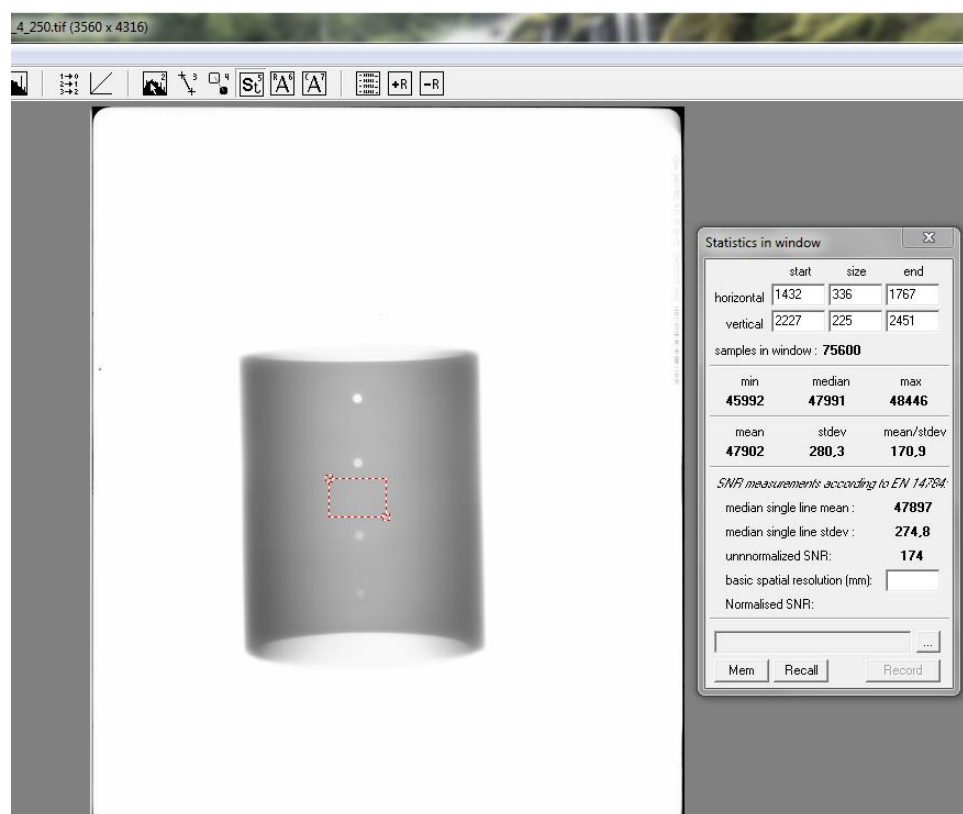
1. Snimanje u trajanju $t=2\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=200\text{kV}$.
2. Snimanje u trajanju $t=1\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=250\text{kV}$.
3. Snimanje u trajanju $t=3,5\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=175\text{kV}$.

Udaljenost izvora zračenja iznosila je $l=700\text{mm}$ za sva snimanja te nisu korištene radiografske folije. Skeniranje slikovne ploče izvršeno je na uređaju za skeniranje VMI5100MS, rezolucije skeniranja $100\text{ }\mu\text{m}$, snage lasera 15 J/m^2 i napona na multiplikatoru $\text{PMT}=5,25\text{V}$. Slike su eksportirane u 16 bit .tiff formatu kako ne bi došlo do gubitka podataka prilikom konverzije.

4.4.1. Mjerenje intenziteta piksela na ispitnom uzorku cijevi

Mjereni su intenziteti piksela stijenki ispitne cijevi I_c , intenziteti piksela provrta u stijenkama ispitnih cijevi poznatih dubina I_R te intenziteti piksela ploče I_p . Provrta u stijenkama ispitne cijevi duboke su redom 25%, 50%, 75% te 100% debljine stijenke ispitne cijevi. Debljina stijenke ispitne cijevi je $x_c=8,2\text{mm}$.

Slika 27 prikazuje proces vršenja mjerenja intenziteta piksela na ispitnom uzorku cijevi. Mjerenja intenziteta piksela izvršena su u programu ISee!. Prilikom mjerenja područja od interesa, odabirom područja bližih centru zračenja, smanjen je utjecaj prirasta debljine.



Slika 27 Mjerenje intenziteta piksela na ispitnom uzorku cijevi

U nastavku slijede tablice s izmjerenim intenzitetima piksela I na području od interesa digitalnog radiograma.

Tablica 9 Intenziteti piksela I_c i I_R pri 3.5min_4mA_175kV

0,25 x_c		0,50 x_c		0,75 x_c		x_c	
I_c	I_R	I_c	I_R	I_c	I_R	I_c	I_R
45060	46520	45604	48554	45533	51029	45630	54442

$$I_p=56087$$

Tablica 10 Intenziteti piksela I_c i I_R pri 2min_4mA_200kV

0,25 x_c		0,50 x_c		0,75 x_c		x_c	
I_c	I_R	I_c	I_R	I_c	I_R	I_c	I_R
45466	46777	46075	48661	45928	50602	45791	53583

$$I_p=55172$$

Tablica 11 Intenziteti piksela I_c i I_R pri 1min_4mA_250kV

0,25 x_c		0,50 x_c		0,75 x_c		x_c	
I_c	I_R	I_c	I_R	I_c	I_R	I_c	I_R
46891	48350	47516	50246	47408	52259	47368	54677

$$I_p=55588$$

Koristeći izraz $y_1=I_c/I_p$ i $y_2=I_R/I_p$ u koji su uvršteni iznosi iz tablice 9, tablice 10 i tablice 11 za ranije navedene energije dobivene su sljedeće vrijednosti prikazane u tablici 12, tablici 13 i tablici 14.

Tablica 12 Koeficijenti y_1 i y_2 pri 3.5min_4mA_175kV

0,25 x_c		0,50 x_c		0,75 x_c		x_c	
y_1	y_2	y_1	y_2	y_1	y_2	y_1	y_2
0.8033	0.8294	0.8130	0.8656	0.8118	0.9098	0.8135	0.9706

Tablica 13 Koeficijenti y_1 i y_2 pri 2min_4mA_200kV

0,25 x_c		0,50 x_c		0,75 x_c		x_c	
y_1	y_2	y_1	y_2	y_1	y_2	y_1	y_2
0.8240	0.8478	0.8351	0.8819	0.8324	0.9171	0.8299	0.9711

Tablica 14 Koeficijenti y_1 i y_2 pri 1min_4mA_250kV

0,25 x_c		0,50 x_c		0,75 x_c		x_c	
y_1	y_2	y_1	y_2	y_1	y_2	y_1	y_2
0.8435	0.8697	0.8547	0.9039	0.8528	0.9401	0.8521	0.9836

4.4.2. Izračun dubina provrta i greške

Upotrebom matematičkog modela izrađenog na temelju krivulja ovisnosti omjera zacrnjenja I i I_0 te izmjerene debljine materijala X aproksimiranih logaritamskom funkcijom prikazano na slici 24., ranije navedenim postupkom, izračunate su dubine provrta u ispitnom uzorku cijevi na temelju mjerenja vidljivih u tablici 9, tablici 10 i tablici 11. U nastavku će biti prikazane izračunate vrijednosti.

Upotrebom matematičkog modela za snimanje u trajanju $t=3,5\text{min.}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=175\text{kV}$ koji glasi $y=-0,425\ln(x)+1,8861$ dobiven je sljedeći izraz: $y_1-y_2=-0,425(\ln(x_1)-\ln(x_2))$ pri čemu je $x_1=2x_c$ zbog prolaska zračenja kroz dvostruku debljinu stijenke ispitne cijevi x_c , a $x_2=2x_c-x_R$. Rezultati dobiveni uvrštavanjem podataka iz tablice 12 prikazani su u tablici 15 koja slijedi. Izmjerena debljina stijenke ispitne cijevi je $x_c=8,2\text{mm}$.

Tablica 15 Usporedba izmjerenih i izračunatih dubina provrta pri 3.5min_4mA_175kV

x_R	25% x_c	50% x_c	75% x_c	100% x_c
Izmjerena dubina provrta [mm]	2	3,6	5,4	8,1
Izračunata dubina provrta [mm]	0,97	1,91	3,38	5,07
Greška	52,6%	53,4%	45%	38,1%

Upotrebom matematičkog modela za snimanje u trajanju $t=2\text{min.}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=200\text{kV}$ koji glasi $y=-0,398\ln(x)+1,8634$ dobiven je sljedeći izraz: $y_1-y_2=-0,398(\ln(x_1)-\ln(x_2))$, pri čemu je $x_1=2x_c$ zbog prolaska zračenja kroz dvostruku debljinu stijenke ispitne cijevi x_c , a $x_2=2x_c-x_R$. Rezultati dobiveni uvrštavanjem podataka iz tablice 13 prikazani su u tablici 16 koja slijedi. Izmjerena debljina stijenke ispitne cijevi je $x_c=8,2\text{mm}$.

Tablica 16 Usporedba izmjerenih i izračunatih dubina provrta pri 2min_4mA_200kV

x_R	25% x_c	50% x_c	75% x_c	100% x_c
Izmjerena dubina provrta [mm]	2	3,6	5,4	8,1
Izračunata dubina provrta [mm]	0,96	1,83	3,15	4,91
Greška	53,1%	55,3%	48,8%	40,1%

Upotrebom matematičkog modela za snimanje u trajanju $t=1\text{min.}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=250\text{kV}$ koji glasi $y=-0,368\ln(x)+1,8008$ dobiven je sljedeći izraz: $y_1-y_2=-0,368(\ln(x_1)-\ln(x_2))$, pri čemu je $x_1=2x_c$ zbog prolaska zračenja kroz dvostruku debljinu stijenke ispitne cijevi x_c , a $x_2=2x_c-x_R$. Rezultati dobiveni uvrštavanjem podataka iz tablice 14 prikazani su u tablici 17 koja slijedi. Izmjerena debljina stijenke ispitne cijevi je $x_c=8,2\text{mm}$.

Tablica 17 Usporedba izmjerenih i izračunatih dubina provrta pri 1min_4mA_250kV

x_R	25% x_c	50% x_c	75% x_c	100% x_c
Izmjerena dubina provrta [mm]	2	3,6	5,4	8,1
Izračunata dubina provrta [mm]	1,13	2,07	3,48	4,94
Greška	44,9%	49,5%	43,1%	39,7%

4.5. Snimanje ispitnog stepeničastih uzoraka te ispitnog uzorka cijevi

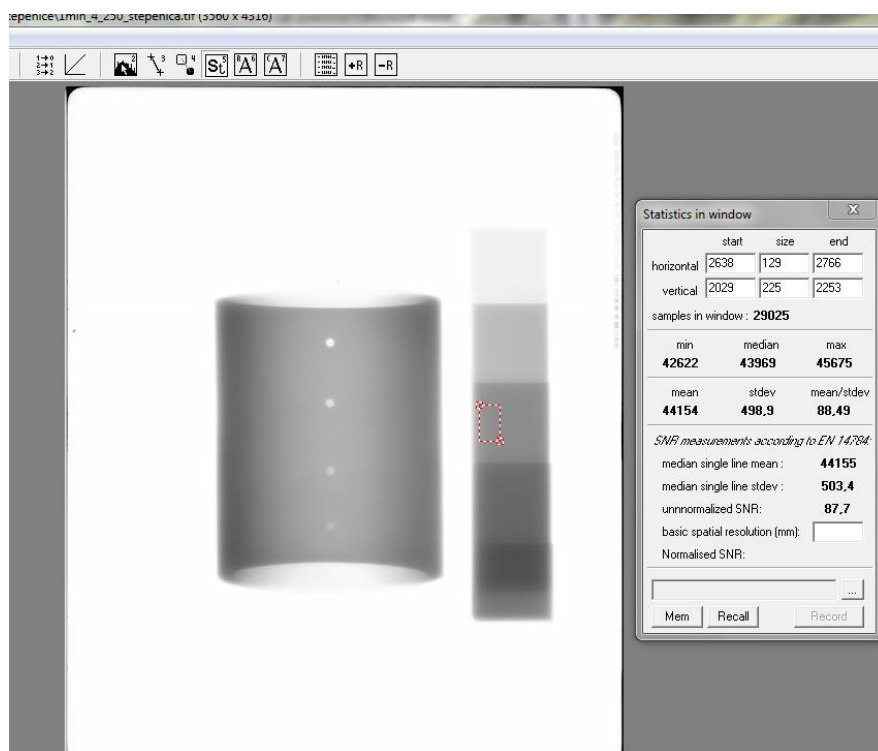
U nastavku rada napravljeno je snimanje ispitnog uzorka cijevi s provrtima poznate dubine te stepeničastog uzorka poznate debljine. Cilj ovih snimanja bio je formirati krivulje na temelju razlike u zacrnjenju pojedine stepenice stepeničastog uzorka, postaviti odgovarajući matematički model te ga ispitati na ispitnom uzorku cijevi s provrtima poznate dubine. Snimanjem ispitne cijevi i stepeničastog uzorka na jednom radiogramu uklonjena je mogućnost greške koja se javlja zbog utjecaja samog rendgenskog uređaja, slikovne ploče, sustava za očitavanje i obradu slike i sl. Ipak, ovdje se očekuje greška zbog utjecaja prirasta debljine budući da se stepeničasti uzorak ne nalazi u centru zračenja.

Prilikom snimanja korištena je slikovna ploča Kodak Industrex GP na koju je postavljen ispitni uzorak cijevi poznate debljine stijenke cijevi $x_c=8,2\text{mm}$, s provrtima u stijenci ispitnog uzorka cijevi, koji su duboki redom 25%, 50%, 75% te 100% debljine stijenke ispitne cijevi, i stepeničasti uzorak uz ispitnu cijev. Određena je udaljenost izvora zračenja $l=700\text{mm}$, izvršeno centriranje ispitne cijevi te određeni parametri snimanja. Ispitna cijev postavljena je u centar rendgenskog snopa kako bi se minimizirao utjecaj prirasta debljine.

Udaljenost izvora zračenja iznosila je $l=700\text{mm}$ za sva snimanja te nisu korištene radiografske folije. Skeniranje slikovne ploče izvršeno je na uređaju za skeniranje VMI5100MS, rezolucije skeniranja $100\text{ }\mu\text{m}$, snage lasera 15 J/m^2 i napona na multiplikatoru $\text{PMT}=5,25\text{V}$. Slike su eksportirane u 16 bit .tiff formatu kako nebi došlo do gubitka podataka prilikom konverzije.

4.5.1. Mjerenje intenziteta piksela na ispitnoj cijevi te stepeničastom uzorku

Slika 28 prikazuje proces vršenja mjerenja intenziteta piksela na ispitnom uzorku cijevi te stepeničastom uzorku položenom uz ispitni uzorak cijevi. Mjerenja intenziteta piksela izvršena su u programu ISee!. Prilikom mjerenja područja od interesa, odabirom područja bližih centru zračenja, smanjen je utjecaj prirasta debljine.



Slika 28 Mjerenje intenziteta piksela na ispitnom uzorku cijevi i stepeničastom uzorku

Slijede tablice s očitanim vrijednostima za snimanja s ovim ekspozicijama:

1. Snimanje u trajanju $t=2\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=200\text{kV}$.
2. Snimanje u trajanju $t=1\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=250\text{kV}$.
3. Snimanje u trajanju $t=3,5\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=175\text{kV}$.

Tablica 18 Intenziteti piksela za stepeničasti uzorak uz ispitni uzorak cijevi pri 3.5min_4mA_175kV

Redni broj	Debljina x [mm]	Intenzitet I	$I/I_{\text{ploče}}$
1.	9	54083	0,9643
2.	14	46244	0,8245
3.	19	41929	0,7475
4.	24	39284	0,7004

$I_{\text{ploče}}=56085$

Tablica 19 Intenziteti piksela za stepeničasti uzorak uz ispitni uzorak cijevi pri 2min_4mA_200kV

Redni broj	Debljina x [mm]	Intenzitet I	$I/I_{\text{ploče}}$
1.	9	54161	0,9666
2.	14	47200	0,8424
3.	19	42379	0,7563
4.	24	39129	0,6983

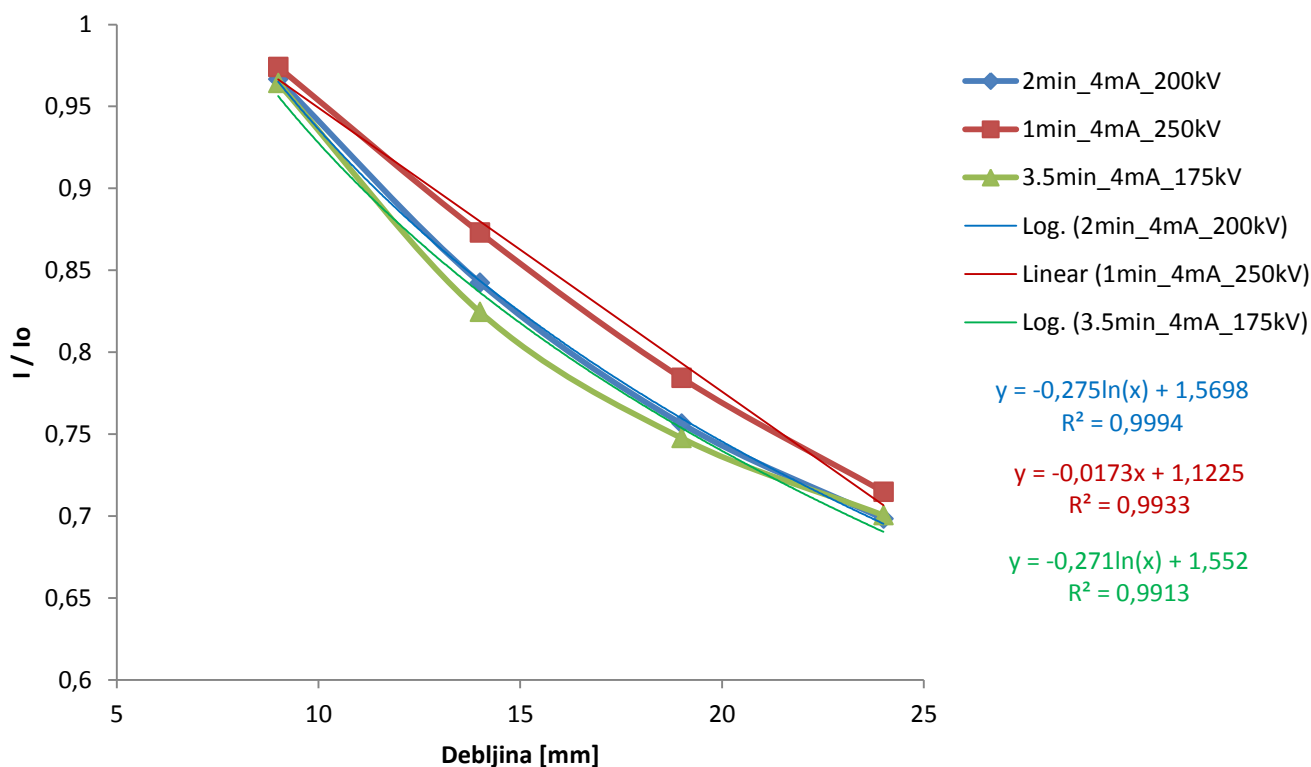
$I_{\text{ploče}}=56030$

Tablica 20 Intenziteti piksela za stepeničasti uzorak uz ispitni uzorak cijevi pri 1min_4mA_250kV

Redni broj	Debljina x [mm]	Intenzitet I	$I/I_{\text{ploče}}$
1.	9	54152	0,9741
2.	14	48528	0,8729
3.	19	43595	0,7842
4.	24	39740	0,7148

$I_{\text{ploče}}=55591$

Na temelju tablice 18, tablice 19 i tablice 20 napravljen je grafički prikaz, slika 29. koja prikazuje ovisnost omjera zacrnljenja I i I_0 te izmjerene debljine materijala X aproksimirana logaritamskom funkcijom za stepeničasti uzorak.



Slika 29 Ovisnost omjera zacrnljenja I i I_0 te izmjerene debljine materijala X aproksimirana logaritamskom funkcijom za stepeničasti uzorak

Na slici 29. koja grafički prikazuje ovisnost omjera zacrnljenja I i I_0 te izmjerene debljine materijala X aproksimirana logaritamskom funkcijom za stepeničasti uzorak te je opisana matematičkim modelom za područje od interesa vidljiva je aproksimacija logaritamskom i linearnom funkcijom te izrada matematičkog modela.

Krivulja dobivena snimanjem u trajanju $t=2\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=200\text{kV}$ aproksimirana je logaritamskom funkcijom a funkcija koja opisuje krivulju glasi

$$y=-0,275\ln(x)+1,5698.$$

Krivulja dobivena snimanjem u trajanju $t=1\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=250\text{kV}$ aproksimirana je linearnom funkcijom a funkcija koja opisuje krivulju glasi

$$y=-0,0173x+1,1225.$$

Krivulja dobivena snimanjem u trajanju $t=3,5\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=175\text{kV}$ aproksimirana je logaritamskom funkcijom a funkcija koja opisuje krivulju glasi

$$y=-0,271\ln(x)+1,552.$$

4.5.2. Izračun dubina provrta i greške

Mjereni su intenziteti piksela stijenki ispitnog uzorka cijevi I_c , intenziteti piksela provrta u stijenama ispitne cijevi poznatih dubina I_R te intenziteti piksela slikovne ploče I_p . Provrti u stijenama ispitne cijevi duboke su redom 25%, 50%, 75% te 100% debljine stijenke ispitne cijevi. Debljina stijenke ispitne cijevi je $x_c=8,2\text{mm}$. Temeljem mjerenja dobivene su tablica 9, tablica 10 i tablica 11.

Koristeći izraz $y_1=I_c/I_p$ i $y_2=I_R/I_p$ u koji su uvršteni iznosi iz tablice 9, tablice 10 i tablice 11 za ranije navedene energije dobivene su vrijednosti prikazane u tablici 12, tablici 13 i tablici 14.

Upotrebom matematičkog modela izrađenog na temelju krivulja ovisnosti omjera zacrnjenja I i I_0 te izmjerene debljine materijala X aproksimiranih logaritamskom funkcijom za stepeničasti uzorak prikazane na slici 29., ranije navedenim postupkom, izračunate su dubine provrta u ispitnoj cijevi na temelju mjerenja vidljivih u tablici 9, tablici 10 i tablici 11. U nastavku će biti prikazane izračunate vrijednosti.

Upotrebom matematičkog modela za snimanje u trajanju $t=3,5\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=175\text{kV}$ koji glasi $y=-0,271\ln(x)+1,552$ dobiven je sljedeći izraz: $y_1-y_2=-0,271(\ln(x_1)-\ln(x_2))$ pri čemu je $x_1=2x_c$ zbog prolaska zračenja kroz dvostruku debljinu stijenke ispitne cijevi x_c , a $x_2=2x_c-x_R$. Rezultati dobiveni uvrštavanjem podataka iz tablice 12 prikazani su u tablici 21 koja slijedi. Izmjerena debljina stijenke ispitne cijevi je $x_c=8,2\text{mm}$.

Tablica 21 Usporedba izmjerenih i izračunatih dubina provrta pri 3.5min_4mA_175kV drugi put

x_R	25% x_c	50% x_c	75% x_c	100% x_c
Izmjerena dubina provrta [mm]	2	3,6	5,4	8,1
Izračunata dubina provrta [mm]	2,22	3,55	5,53	7,64
Greška	9,9%	1,38%	2,3%	5,7%

Upotrebom matematičkog modela za snimanje u trajanju $t=2\text{min.}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=200\text{kV}$ koji glasi $y=-0,275\ln(x)+1,5698$ dobiven je sljedeći izraz: $y_1-y_2=-0,275(\ln(x_1)-\ln(x_2))$, pri čemu je $x_1=2x_c$ zbog prolaska zračenja kroz dvostruku debljinu stijenke ispitne cijevi x_c , a $x_2=2x_c-x_R$. Rezultati dobiveni uvrštavanjem podataka iz tablice 13 prikazani su u tablici 22 koja sljedeći. Izmjerena debljina stijenke ispitne cijevi je $x_c=8,2\text{mm}$.

Tablica 22 Usporedba izmjerenih i izračunatih dubina provrta pri 2min_4mA_200kV drugi put

x_R	25% x_c	50% x_c	75% x_c	100% x_c
Izmjerena dubina provrta [mm]	2	3,6	5,4	8,1
Izračunata dubina provrta [mm]	2,09	3,24	4,93	7,06
Greška	0,04%	10%	8,7%	12,8%

Upotrebom matematičkog modela za snimanje u trajanju $t=1\text{min.}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=250\text{kV}$ koji glasi $y=-0,0173x+1,1225$ dobiven je sljedeći izraz: $y_1-y_2=-0,0173(x_1-x_2)$, pri čemu je $x_1=2x_c$ zbog prolaska zračenja kroz dvostruku debljinu stijenke ispitne cijevi x_c , a $x_2=2x_c-x_R$. Rezultati dobiveni uvrštavanjem podataka iz tablice 14 prikazani su u tablici 23 koja sljedeći. Izmjerena debljina stijenke ispitne cijevi je $x_c=8,2\text{mm}$.

Tablica 23 Usporedba izmjerenih i izračunatih dubina provrta pri 1min_4mA_250kV drugi put

x_R	25% x_c	50% x_c	75% x_c	100% x_c
Izmjerena dubina provrta [mm]	2	3,6	5,4	8,1
Izračunata dubina provrta [mm]	1,52	2,84	5,04	7,6
Greška	24%	21,1%	6,6%	6,2%

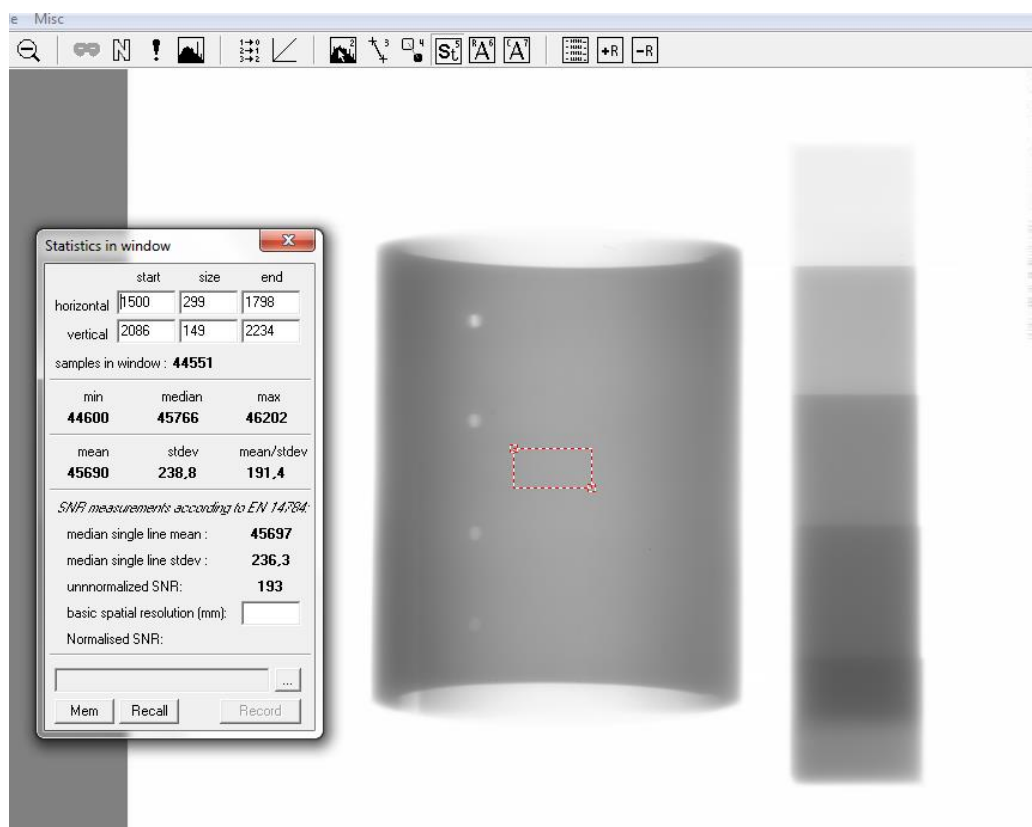
4.6. Snimanje zakrenutog ispitnog uzorka cijevi

Prilikom snimanja korištena je slikovna ploča Kodak Industrex GP na koju je postavljen ispitni uzorak cijevi poznate debljine stijenke ispitne cijevi $x_c=8,2\text{mm}$, zakrenut oko svoje osi za $b=3\text{cm}$, s provrtima u stijenci ispitne cijevi, koji su duboki redom 25%, 50%, 75% te 100% debljine stijenke ispitne cijevi, i stepeničasti uzorak uz ispitnu cijev. Određena je udaljenost izvora zračenja $l=700\text{mm}$, izvršeno centriranje ispitne cijevi te određeni parametri snimanja. Ispitna cijev je postavljena u centar rendgenskog snopa kako bi se minimizirao utjecaj prirasta debljine, ali zakrenuta oko svoje osi za $b=3\text{cm}$ kako bi se utvrdilo postoji li greška prirasta debljine zbog zakretanja ispitne cijevi. Ovdje se očekuje greška zbog utjecaja prirasta debljine kod stepeničastog uzorka budući da se stepeničasti uzorak ne nalazi u centru zračenja.

Udaljenost izvora zračenja iznosila je $l=700\text{mm}$ te nisu korištene radiografske folije. Skeniranje slikovne ploče izvršeno je na uređaju za skeniranje VMI5100MS, rezolucije skeniranja $100\text{ }\mu\text{m}$, snage lasera 15 J/m^2 i napona na multiplikatoru $\text{PMT}=5,25\text{V}$. Slike su eksportirane u 16 bit .tiff formatu kako ne bi došlo do gubitka podataka prilikom konverzije.

4.6.1. Mjerenje intenziteta piksela na zakrenutom ispitnom uzorku cijevi

Slika 30 prikazuje proces vršenja mjerenja intenziteta piksela na ispitnom uzorku cijevi zakrenutom za $b=3\text{cm}$ te stepeničastom uzorku položenom uz ispitni uzorak cijevi. Mjerenja intenziteta piksela izvršena su u programu ISee!. Prilikom mjerenja područja od interesa, odabirom područja bližih centru zračenja, smanjen je utjecaj prirasta debljine.



Slika 30 Mjerenje intenziteta piksela na zakrenutom ispitnom uzorku cijevi i stepeničastom uzorku

Podaci u tablici 24 koja sljedi nastali su kao produkt snimanja u trajanju $t=1\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=250\text{kV}$.

Mjereni su intenziteti piksela stijenke ispitnog uzorka cijevi I_c , intenziteti piksela provrta u stijenama ispitnog uzorka cijevi poznatih dubina I_R te intenziteti piksela slikovne ploče. Provrti u stijenama ispitne cijevi duboki su redom 25%, 50%, 75% te 100% debljine stijenke ispitne cijevi. Debljina stijenke ispitne cijevi je $x_c=8,2\text{mm}$. Ispitna cijev je zakrenuta oko svoje osi za $b=3\text{cm}$ od centra zračenja kako bi se utvrdilo postoji li utjecaj prirasta debljine. U nastavku slijedi tablica 24 s izmjerenim intenzitetima piksela.

Tablica 24 Intenziteti piksela I_c i I_R pri 1min_4mA_200kV, zakrenuta ispitna cijev

0,25 x_c		0,50 x_c		0,75 x_c		x_c	
I_c	I_R	I_c	I_R	I_c	I_R	I_c	I_R
43071	44030	43722	45900	43755	47622	43643	50357

$$I_p=56051$$

Koristeći izraz $y_1=I_c/I_p$ i $y_2=I_R/I_p$ u koji su uvršteni iznosi iz tablice 24 za ranije navedenu ekspoziciju, dobivene su sljedeće vrijednosti prikazane u tablici 25.

Tablica 25 Koeficijenti y_1 i y_2 pri 1min_4mA_200kV, zakrenuta ispitna cijev

0,25 x_c		0,50 x_c		0,75 x_c		x_c	
y_1	y_2	y_1	y_2	y_1	y_2	y_1	y_2
0,7695	0,7857	0,7760	0,8188	0,7751	0,8492	0,7740	0,8979

4.6.2. Izračun dubina provrta i greške

Upotrebom matematičkog modela izrađenog na temelju krivulja ovisnosti omjera zacrtnjenja I i I_0 te izmjerene debljine materijala X aproksimiranih logaritamskom funkcijom za stepeničasti uzorak prikazanih na slici 29., ranije navedenim postupkom, izračunate su dubine provrta u ispitnoj cijevi na temelju mjerenja vidljivih u tablici 24. U nastavku će biti prikazane izračunate vrijednosti.

Upotrebom matematičkog modela za snimanje u trajanju $t=1\text{min.}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=200\text{kV}$ koji glasi $y=-0,275\ln(x)-1,5698$ dobiven je sljedeći izraz: $y_1-y_2=-0,275(\ln(x)_1-\ln(x)_2)$, pri čemu je $x_1=2x_c$ zbog prolaska zračenja kroz dvostruku debljinu stijenke ispitne cijevi x_c , a $x_2=2x_c-x_R$. Rezultati dobiveni uvrštavanjem podataka iz tablice 25 prikazani su u tablici 26 koja slijedi. Izmjerena debljina stijenke ispitne cijevi je $x_c=8,2\text{mm}$.

Tablica 26 Usporedba izmjerenih i izračunatih dubina provrta pri 1min_4mA_250kV, zakrenuta ispitna cijev

x_R	25% x_c	50% x_c	75% x_c	100% x_c
Izmjerena dubina provrta [mm]	2	3,6	5,4	8,1
Izračunata dubina provrta [mm]	1,68	3,04	4,48	6,45
Greška	16%	15,5%	17%	20,3%

4.7. Snimanje stepeničastih ispitnih uzoraka drugi put

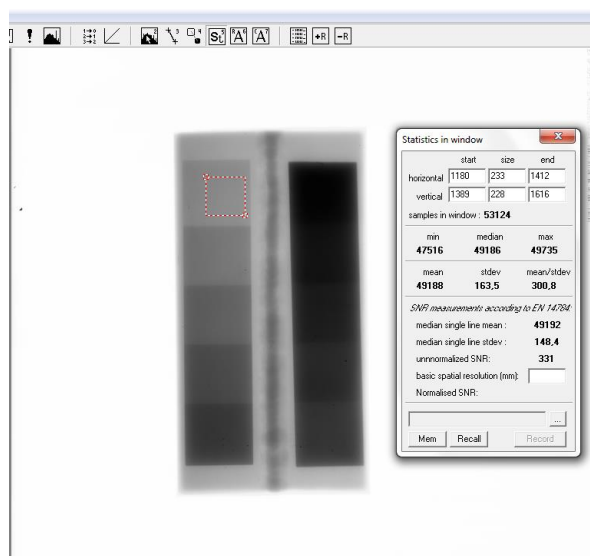
Podaci u tablicama koje slijede nastali su kao produkt tri snimanja. Napravljeni su radiogrami stepeničastih uzoraka te ispitne cijevi. Izvršena su snimanja sa sljedećim parametrima:

1. Snimanje u trajanju $t=1,5\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=200\text{kV}$.
2. Snimanje u trajanju $t=50\text{ sec}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=250\text{kV}$.
3. Snimanje u trajanju $t=3\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=175\text{kV}$.

Udaljenost izvora zračenja iznosila je $l=700\text{mm}$ za sva tri snimanja te nisu korištene radiografske folije. Skeniranje slikovne ploče izvršeno je na uređaju za skeniranje VMI5100MS, rezolucije skeniranja $100\text{ }\mu\text{m}$, snage lasera 15 J/m^2 i napona na multiplikatoru $\text{PMT}=5,25\text{V}$. Slike su eksportirane u 16 bit .tiff formatu kako ne bi došlo do gubitka podataka prilikom konverzije.

4.7.1. Mjerenja intenziteta piksela za stepeničasti uzorak drugi put

Mjerenja intenziteta piksela izvršena su u programu ISee!. Prilikom mjerenja područja od interesa, odabirom područja bližih centru zračenja, smanjen je utjecaj prirasta debljine što je vidljivo na slici 31.



Slika 31 Mjerenje intenziteta piksela na stepeničastom uzorku drugi put

U nastavku slijede tablice s izmjerenim intenzitetima piksela na području od interesa digitalnog radiograma za stepeničasti uzorak.

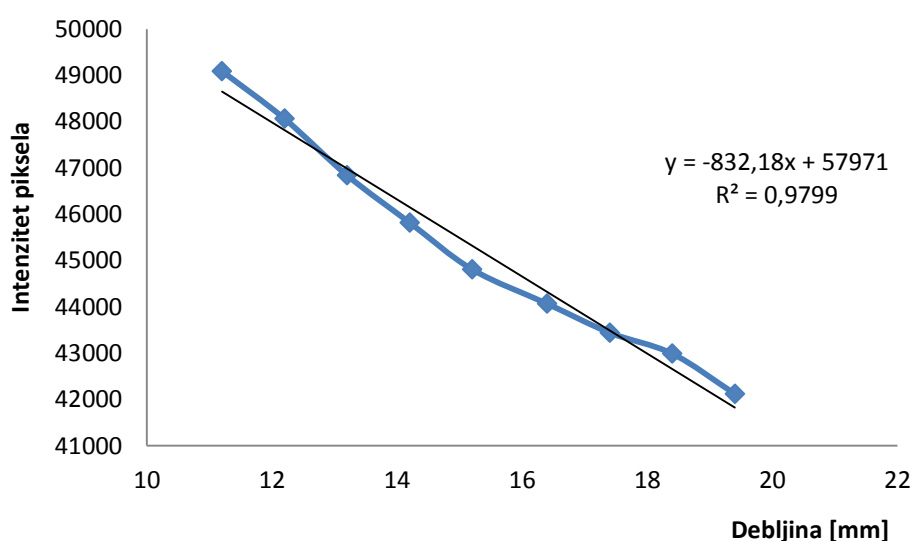
Tablica 27 Intenziteti piksela za stepeničasti uzorak 2. put

	3min_4mA_175kV	1,5min_4mA_200kV	3min_4mA_250kV
Debljina [mm]	Intenzitet piksela	Intenzitet piksela	Intenzitet piksela
11,2	49090	44011	50790
12,2	48062	43330	49671
13,2	46840	42664	48571
14,2	45819	41842	47255
15,2	44808	40978	46120
16,4	43940	40434	45355
17,4	43440	39619	44796
18,4	42987	38644	44191
19,4	42120	37562	43446
20,4	42731	36593	42731

4.7.2. Grafički prikaz ovisnosti intenziteta piksela i debljine materijala

Na temelju podataka iz tablice 27 napravljeni su grafički prikazi intenziteta piksela i debljine za stepeničasti uzorak za snimanja s prethodno navedenim parametrima.

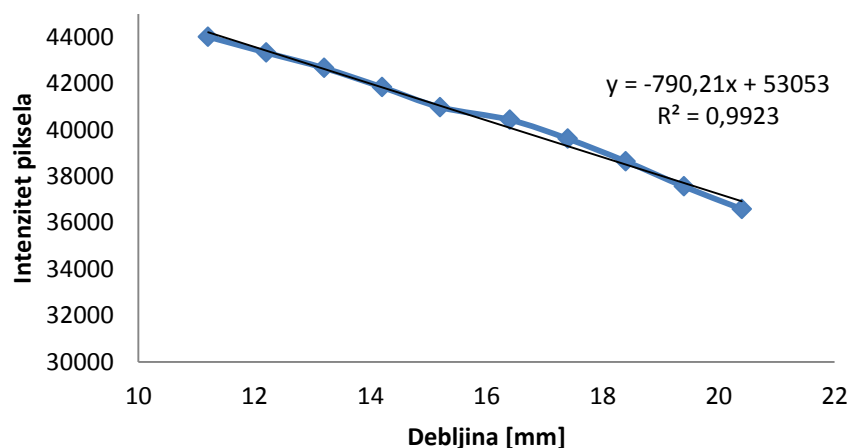
Na slikama 32, 33, i 34 koje grafički prikazuju odnos intenziteta piksela te izmjerene debljine materijala X za stepeničasti uzorak, krivulja je aproksimirana linearnom funkcijom te je opisana matematičkim modelom za područje od interesa. Vidljiva je aproksimacija linearnom funkcijom te izrada matematičkog modela.



Slika 32 Ovisnost intenziteta piksela i debljine za 175kV_4mA_3min

Krivulja dobivena snimanjem u trajanju $t=3\text{min}$. struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=175\text{kV}$ aproksimirana je linearnom funkcijom a funkcija koja opisuje krivulju glasi

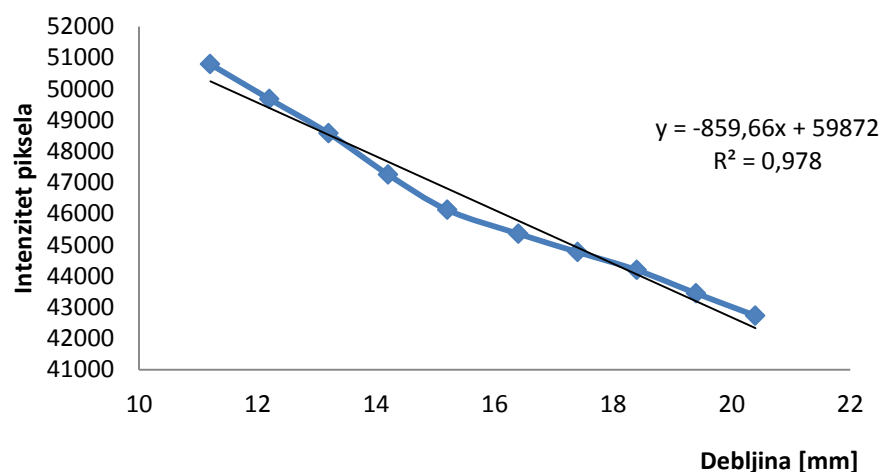
$$y = -832,18x + 57971.$$



Slika 33 Ovisnost intenziteta piksela i debljine za 200kV_4mA_1,5min

Krivulja dobivena snimanjem u trajanju $t=1,5\text{min}$. struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=200\text{kV}$ aproksimirana je linearnom funkcijom a funkcija koja opisuje krivulju glasi

$$y = -790,21x + 53053.$$



Slika 34 Ovisnost intenziteta piksela i debljine za 250kV_4mA_50sec

Krivulja dobivena snimanjem u trajanju $t=1,5\text{min}$. struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=200\text{kV}$ aproksimirana je linearnom funkcijom a funkcija koja opisuje krivulju glasi

$$y = -859,66x + 59872.$$

4.8. Snimanje ispitnog uzorka cijevi drugi put

Slike koje slijede u nastavku prikazuju ispitni uzorak cijevi na kojoj je izvršeno snimanje. Prilikom snimanja korištena je slikovna ploča Kodak Industrex GP na koju je postavljena ispitna cijev poznate debljine stijenke cijevi $x_c=8,1\text{mm}$, s provrtima u stijenci cijevi, koje su duboke redom 25%, 50%, 75% te 100% debljine stijenke cijevi. Određena je udaljenost izvora zračenja $l=700\text{mm}$, izvršeno centriranje ispitne cijevi te određeni parametri snimanja. Ispitna cijev postavljena je u centar rendgenskog snopa kako bi se minimizirao utjecaj prirasta debljine. Na slici 26 prikazan je ispitni uzorak cijevi s provrtima.

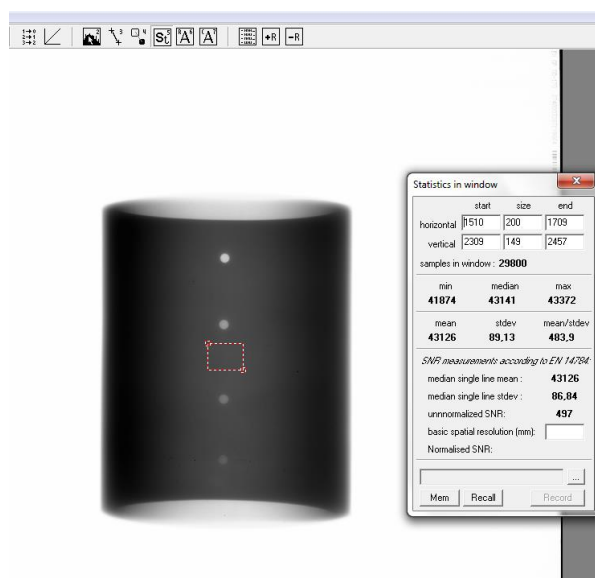
Podaci u tablicama koje slijede nastali su kao produkt niže navedenih snimanja. Izvršena su snimanja sa sljedećim parametrima:

1. Snimanje u trajanju $t=1,5\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=200\text{kV}$.
2. Snimanje u trajanju $t=50\text{sec}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=250\text{kV}$.
3. Snimanje u trajanju $t=3\text{min}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=175\text{kV}$.

Udaljenost izvora zračenja iznosila je $l=700\text{mm}$ za sva snimanja te nisu korištene radiografske folije. Skeniranje slikovne ploče izvršeno je na uređaju za skeniranje VMI5100MS, rezolucije skeniranja $100\text{ }\mu\text{m}$, snage lasera 15 J/m^2 i napona na multiplikatoru $\text{PMT}=5,25\text{V}$. Slike su eksportirane u 16 bit .tiff formatu kako ne bi došlo do gubitka podataka prilikom konverzije.

4.8.1. Mjerenja intenziteta piksela ispitnog uzorka cijevi drugi put

U nastavku su mjereni intenziteti piksela stijenke ispitne cijevi I_c i intenziteti piksela provrta u stijenkama ispitne cijevi poznatih dubina I_R . Temeljem mjerenja dobivene su tablica 28, tablica 29 i tablica 30. Mjerenje intenziteta piksela na ispitnom uzorku cijevi prikazano je na slici 35.



Slika 35 Mjerenje intenziteta piksela na ispitnom uzorku cijevi drugi put

Tablica 28 Intenziteti piksela I_c i I_R pri 3min_4mA_175kV

0,25 x_c		0,50 x_c		0,75 x_c		x_c	
I_c	I_R	I_c	I_R	I_c	I_R	I_c	I_R
42873	44086	43278	45474	43272	47478	43207	50131

Tablica 29 Intenziteti piksela I_c i I_R pri 1,5min_4mA_200kV

0,25 x_c		0,50 x_c		0,75 x_c		x_c	
I_c	I_R	I_c	I_R	I_c	I_R	I_c	I_R
41847	43061	42154	44607	42117	46548	42008	49130

Tablica 30 Intenziteti piksela I_c i I_R pri 50sec_4mA_250kV

0,25 x_c		0,50 x_c		0,75 x_c		x_c	
I_c	I_R	I_c	I_R	I_c	I_R	I_c	I_R
46451	47761	46879	49386	46720	51359	46528	53462

4.8.2. Izračun dubina provrta i greške

Koristeći izraz $y_I = I_c$ i $y_2 = I_R$ u koji su uvršteni iznosi iz tablice 28, tablice 29 i tablice 30 za ranije navedene energije te matematički model koji ih prati, izračunate su dubine provrta prikazane u tablici 31, tablici 32 i tablici 33 koje slijede.

Upotrebom matematičkog modela za snimanje u trajanju $t=3\text{min}$. struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=175\text{kV}$ koji glasi $y=-832,18x+57971$ dobiven je sljedeći izraz: $y_I - y_2 = -832,18(x_I - x_2)$, pri čemu je $x_I = 2x_c$ zbog prolaska zračenja kroz dvostruku debljinu stijenke ispitne cijevi x_c , a $x_2 = 2x_c - x_R$. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 31 koja slijedi. Izmjerena debljina stijenke ispitne cijevi je $x_c = 8,1\text{mm}$.

Tablica 31 Usporedba izmjerenih i izračunatih dubina provrta pri 3min_4mA_175kV

x_R	25% x_c	50% x_c	75% x_c	100% x_c
Izmjerena dubina provrta [mm]	2	3,6	5,4	8,1
Izračunata dubina provrta [mm]	1,45	2,99	5,1	8,3
Greška	27,5%	16,9%	5,5%	2,4%

Upotrebom matematičkog modela za snimanje u trajanju $t=1.5\text{min.}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=200\text{kV}$ koji glasi $y=-790,21x+53053$ dobiven je sljedeći izraz: $y_1-y_2=-790,21(x_1-x_2)$, pri čemu je $x_1=2x_c$ zbog prolaska zračenja kroz dvostruku debljinu stijenke ispitne cijevi x_c , a $x_2=2x_c-x_R$. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 32 koja slijedi. Izmjerena debljina stijenke ispitne cijevi je $x_c=8,1\text{mm}$.

Tablica 32 Usporedba izmjerenih i izračunatih dubina provrta pri 1.5min_4mA_200kV

x_R	25% x_c	50% x_c	75% x_c	100% x_c
Izmjerena dubina provrta [mm]	2	3,6	5,4	8,1
Izračunata dubina provrta [mm]	1,54	3,17	5,82	8,77
Greška	23%	11,9%	7,2%	6,6%

Upotrebom matematičkog modela za snimanje u trajanju $t=50\text{sec.}$, struje jakosti $I=4\text{mA}$ i energije $U=250\text{kV}$ koji glasi $y=-859,66x+59872$ dobiven je sljedeći izraz: $y_1-y_2=-859,66(x_1-x_2)$, pri čemu je $x_1=2x_c$ zbog prolaska zračenja kroz dvostruku debljinu stijenke ispitne cijevi x_c , a $x_2=2x_c-x_R$. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 33 koja slijedi. Izmjerena debljina stijenke ispitne cijevi je $x_c=8,1\text{mm}$.

Tablica 33 Usporedba izmjerenih i izračunatih dubina provrta pri 50sec_4mA_250kV

x_R	25% x_c	50% x_c	75% x_c	100% x_c
Izmjerena dubina provrta [mm]	2	3,6	5,4	8,1
Izračunata dubina provrta [mm]	1,52	2,91	5,34	8,06
Greška	24%	19,1%	1,1%	0,01%

5. Zaključak

U radu je istražena mogućnost određivanja stanjenja stijenke cijevi korištenjem računalne radiografije pomoću mjerenja razlike u intenzitetu piksela na području od interesa digitalnog radiograma. U tu svrhu provedeno je nekoliko eksperimenata na uzorku cijevi s poznatim stanjenjima stijenke cijevi. Također, razmatrana su dva pristupa rješavanja problema:

- određivanje stanjenja stijenke pomoću referentnog uzorka na istom digitalnom radiogramu kao i uzorak;
- konstrukcijom krivulja odaziva slikovnih ploča na određenu dozu zračenja koje su korištene za neposredno utvrđivanje stanjenja stijenke.

Iz provedene analize dobiveni su sljedeći zaključci:

- da bi se postigla najveća točnost mjerenja stanjenja stijenke cijevi potrebno je prilagoditi radiografsku ekspoziciju optimalnom području odaziva slikovne ploče (linearni dio);
- korištenjem većih energija zračenja moguće je provesti procjenu stanjenja stijenke u širem rasponu prozračenih debljina ispitnog objekta;
- upotrebom nižih energija zračenja omogućena je veća preciznost procjene stanjenja stijenke ispitnog objekta;
- pri istim energijama snimanja doza zračenja ne utječe značajno na procjenu stanjenja stijenke cijevi ukoliko je osiguran uvjet da je radiografska ekspozicija prilagođena optimalnom području odaziva slikovne ploče;
- odaziv slikovne ploče u području zasićenja nije proporcionalan dozi zračenja;
- procjenu stanjenja stijenke cijevi moguće je neposredno odrediti pomoću prethodno konstruiranih krivulja slikovnih ploča.

U cilju postizanja veće točnosti procjene stanjenja stijenke cijevi pomoću analize intenziteta piksela na digitalnom radiogramu potrebno je dodatno provesti istraživanja utjecaja ujednačenosti snopa izvora ionizirajućeg zračenja, utjecaja prirasta debljine kao i ponovljivosti radiografske ekspozicije. Unatoč tome, dobiveni rezultati upućuju da je opisanu tehniku moguće koristiti za procjenu stanjenja stijenke cijevi u inženjerskoj praksi imajući na umu njezina ograničenja.

6. Literatura

[1] Nuclear Instruments and Methods

URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900298004914>

[2] Raad J.A., Kuiper A., Industrial Radiography, GE Sensing & Inspection technologies, 2009. Godine

[3] GE – Sensing and inspection technologies;

URL: <http://www.geinspectiontechnologies.com>

[4] Miletić D., Digitalni zapis u radiologiji

URL: <http://www.medri.uniri.hr/katedre/Radiologija/>

[5] Virtual Media Integration;

URL: www.starrview.com

[6] NDT Resource center;

URL: www.ndt-ed.org

[7] CARESTREAM; Rochester, Pub No. TI-2632, 2/12

[8] New concepts for corrosion Inspection of Pipelines by Digital Industrial Radiology (DIR)

URL: <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn325/idn325.htm>

[8] Radiography in Modern Industry,

URL: <http://www.kodak.com/eknec/documents/87/0900688a802b3c87/Radiography-in-Modern-Industry.pdf>